

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

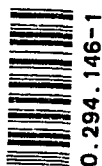
CADASTRO DE ALUNOS
FOTOGRAFIA

Doc. 1001

Fernando José Caldeira Bastos Filho _____
_____ 07/08/1998

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ACOMPANHAMENTO DO
DESEMPENHO DE TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO FRANCIS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Produção.



UFSC-BU



Florianópolis, agosto de 1998

Fernando José Caldeira Bastos Filho

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ACOMPANHAMENTO DO
DESEMPENHO DE TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO FRANCIS**

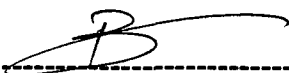
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Produção.

Florianópolis
1998

Fernando José Caldeira Bastos Filho


**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ACOMPANHAMENTO DO
DESEMPENHO DE TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO FRANCIS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, especialidade em Engenharia de Produção, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

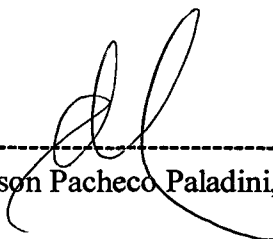


Ricardo Miranda Barcia , Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Banca Examinadora:



Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.
Orientador



Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.



Prof. Jorge Coelho, Dr.

À meus filhos, Fernando e Branca.

AGRADECIMENTOS

Em especial, agradeço, o engenheiro Ricardo César Pamplona Silva, que sempre incentivou e tornou possível a realização deste trabalho. Nenhuma outra palavra pode ser dita neste momento para expressar gratidão, a não ser, “Muito Obrigado Ricardo”.

Agradeço, também, as seguintes pessoas e instituições:

A entidade ITAIPU BINACIONAL, em nome do Diretor Geral Brasileiro, do Diretor Técnico Executivo e do Diretor Administrativo Brasileiro, pelo apoio e suporte durante a realização deste trabalho;

A Superintendência de Engenharia, em nome do Superintendente Erwin Backmann Beck e do Vice-Superintendente Alexandre Machado Fernandes Filho, por acreditarem e viabilizarem este projeto;

A UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, por oferecer o curso de Mestrado em Engenharia de Produção;

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, nas pessoas dos professores e funcionários;

Ao Professor Sérgio Fernando Mayerle, pela orientação do trabalho;

Ao Professor Edson Pacheco Paladini, pela participação como membro da banca examinadora;

Ao Professor Jorge Coelho, pela participação como membro da banca examinadora;

Ao Professor Plínio Stange (in memoriam);

Ao Professor Osmar Possamai, por acreditar na viabilidade deste projeto;

A Patrícia Maciel Monteiro Bastos, que foi sempre uma grande incentivadora para que este trabalho se tornasse realidade;

A toda minha família;

Aos colegas Filipe Leyser, da Superintendência de Informática e Walter Hitossi Nabeyama, da Superintendência de Operação, pela colaboração durante a execução do presente trabalho;

Ao colega Marcus de Almeida Rezende, da Superintendência de Engenharia, pelo incentivo e colaboração na execução do presente trabalho e,

Aos colegas da Divisão Eletromecânica, pelo apoio e incentivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1- Origem do Trabalho	1
1.2- Objetivo do Trabalho	1
1.3- Importância do Trabalho	2
1.4- Metodologia do Trabalho	2
1.5- Limites do Trabalho	3
1.6- Estrutura do Trabalho	3
CAPÍTULO 2 - O CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP) COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE	5
2.1- Introdução	5
2.2- Histórico da Qualidade	5
2.3- Controle Estatístico do Processo	11
2.3.1- A Teoria Básica do CEP	12
2.3.2- Revisão dos Conceitos Estatísticos Básicos	13
2.3.3- Construção dos Gráficos de Controle	21
2.3.4- Análise dos Gráficos de Controle	34
2.3.5- Outros Gráficos do CEP	39
2.4- Considerações Finais	42
CAPÍTULO 3 - FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS E METODOLOGIA PROPOSTA	43
3.1- Caracterização da Turbina em uma Central Hidrelétrica	43
3.2- Caracterização do Problema	47
3.3- Metodologia Proposta	57
3.3.1- Obtenção do Índice de Desempenho	58

3.3.2- Escolha do Tipo de Gráfico de Controle	60
3.3.3- Determinação dos Limites de Controle	61
3.3.4- Construção dos Gráficos de Controle	61
3.3.5- Avaliação dos Resultados	62
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO PRÁTICA	63
4.1- A Entidade ITAIPU BINACIONAL	63
4.1.1- Histórico	63
4.1.2- Turbinas Francis	64
4.2- Aplicação Prática da Metodologia	69
4.2.1- Memória de Cálculos	69
4.2.2- Aplicação Prática	70
4.2.3- Construção e Análise dos Gráficos de Controle	74
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	95
5.1- Conclusões	95
5.2- Recomendações	97
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	98
BIBLIOGRAFIA	99
ANEXO	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Produto com limites de especificação	13
Figura 2.2:	Produto com limites de especificação, porém, com indicativo de meta	13
Figura 2.3:	Curva Normal ($\mu = 2,5$; $\sigma = 1,0$)	19
Figura 2.4:	Curva mostrando relacionamento da Curva Normal com gráfico de controle de qualidade	20
Figura 2.5:	Gráfico tipo \bar{X} e R	25
Figura 2.6:	Gráfico tipo \bar{X} e s	27
Figura 2.7:	Gráfico tipo MA e MR	29
Figura 2.8:	Gráfico tipo p	31
Figura 2.9:	Gráfico tipo np	32
Figura 2.10:	Gráfico tipo u	33
Figura 2.11:	Gráfico tipo c	34
Figura 2.12:	Gráfico de controle mostrando variações extremas	35
Figura 2.13:	Gráfico de controle mostrando desvios	35
Figura 2.14:	Gráfico de controle mostrando tendências	36
Figura 2.15:	Gráfico de controle mostrando ciclos	36
Figura 2.16:	Gráfico de controle mostrando falta de variabilidade	37
Figura 2.17:	Gráfico de controle mostrando variabilidade excessiva	37
Figura 2.18:	Gráfico de Pareto	41
Figura 3.1:	Gráfico de Colina	49
Figura 4.1:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 01	77
Figura 4.2:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 02	78
Figura 4.3:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 03	79
Figura 4.4:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 04	80
Figura 4.5:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 06	81

Figura 4.6:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 07	82
Figura 4.7:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 08	83
Figura 4.8:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 09	84
Figura 4.9:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 10	85
Figura 4.10:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 11	86
Figura 4.11:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 12	87
Figura 4.12:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 13	88
Figura 4.13:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 14	89
Figura 4.14:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 15	90
Figura 4.15:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 16	91
Figura 4.16:	Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 18	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características da filosofia da qualidade, segundo
Crosby, Juran e Deming 9

Tabela 3.1: Classificação das Turbinas Hidráulicas 45

Tabela 3.2: Classificação das Turbinas Kaplan, Francis e Pelton
em função da velocidade específica 46

Tabela 4.1: Eficiências garantidas, medidas e preditas pelo protótipo 67

RESUMO

A utilização do Controle Estatístico do Processo (CEP) como ferramenta de análise, seja qual for a atividade e a natureza das empresas, tem em comum o objetivo, de provocar a melhoria da qualidade do processo.

Neste sentido, apresenta-se a proposta de uma nova metodologia para acompanhamento do desempenho de turbinas tipo Francis, utilizando-se dos conceitos do CEP, aliado ao conhecimento dos resultados dos ensaios em modelo reduzido e no campo, desenvolvidos nas turbinas da ITAIPU BINACIONAL, entidade onde trabalha o autor.

Inicia-se a abordagem do tema relacionando a questão do controle estatístico do processo com o contexto da qualidade. O CEP é apresentado, de tal forma que se conheça perfeitamente seus conceitos, suas características e sua operacionalidade. Através da experiência adquirida na entidade citada, quando da realização de ensaios em suas turbinas, explica-se a metodologia de criação de um índice de desempenho, a partir da divisão do valor de potência real gerada, pelo valor da potência esperada, obtida através da transposição do modelo para o protótipo.

Utilizando-se a teoria do Controle Estatístico do Processo, através de gráficos de controle, apresenta-se uma aplicação prática da metodologia proposta.

ABSTRACT

The employment of Statistical Process Control (SPC) as an analysis tool, whatever the nature and activity of the business, fulfills the common aim of improving process quality.

This study presents a proposal for a new methodology for monitoring the performance of Francis-type turbines through the use of SPC concepts, together with the knowledge gained by tests with reduced models and with full-size units in the field at ITAIPU BINACIONAL, where the author works.

The initial approach to the subject links the question of statistical process control to the context of the quality. The SPC is introduced in such a manner as to perfectly comprehend its concepts, its features and its operation. By means of the experience acquired at the above-mentioned Power Plant during the execution of tests on its turbines, explanations are given on the methodology of creating a performance index, based on dividing the value of the real power generated, by the value of the expected power, obtained through transposition from the model to the prototype.

A practical application of the proposed methodology is presented through the use of the Statistical Process Control theory, together with graphs illustrating the control.

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

1.1 Origem do Trabalho

O aumento do consumo de energia elétrica no Brasil vem fazendo com que as concessionárias do setor elétrico, busquem alternativas para disponibilizar ao máximo a potência instalada de suas usinas, que pode ser tanto de origem hidráulica, como térmica ou nuclear.

Dentre as várias alternativas, no caso das usinas hidrelétricas, está o controle do desempenho das turbinas, via ensaios de eficiência relativa, os chamados "Index-Tests". Estes ensaios, porém, além de necessitarem de equipamentos especiais, programação antecipada devido aos problemas de demanda do sistema, precisam ser repetidos várias vezes, para se poder acompanhar o desempenho das turbinas ao longo do tempo.

Entende-se, portanto, que a implantação de uma nova metodologia de acompanhamento do desempenho das turbinas ao longo do tempo, sem a necessidade de equipamentos especiais ou de parada de máquina, seria uma grande oportunidade de se poder controlar o processo e estabelecimento de um sistema de verificação, simples e prático.

Tendo em vista a carência de trabalhos técnicos que esclareçam a utilização do controle estatístico do processo para uso no controle do desempenho de turbinas hidráulicas, escolheu-se este tema como objeto de estudo, haja vista a sua grande versatilidade e, também, seu poder de prevenção.

Escolheu-se como fonte de pesquisa, as turbinas tipo Francis, instaladas na ITAIPU BINACIONAL, onde trabalha o autor.

1.2 Objetivo do Trabalho

A partir de uma revisão dos conceitos relacionados com o Controle Estatístico do Processo propor uma nova metodologia para controle do desempenho de uma turbina hidráulica tipo Francis.

Fundamentalmente procura através de exemplos relacionados com ensaios específicos de controle do desempenho de turbinas tipo Francis, mostrar que apesar da existência de normas específicas com relação ao assunto e dos excelentes resultados alcançados, a execução destes ensaios é problemática, dificultando sua utilização como ferramenta de análise.

1.3 Importância do Trabalho

Justifica-se a importância deste trabalho devido aos seguintes fatores:

- Relevância técnica, pelo fato de que a metodologia proposta se materializa em melhoria do processo, sendo sustentado operacionalmente através da padronização das atividades;
- Relevância bibliográfica, pelo fato de que o tema carece de bibliografia, principalmente quando abordado sob a ótica do Controle Estatístico do Processo, como é o caso.

1.4 Metodologia do Trabalho

A metodologia adotada teve como base os trabalhos desenvolvidos na ITAIPU BINACIONAL, com relação aos ensaios em modelo reduzido e aos de eficiência relativa, realizados em suas turbinas.

Partiu-se da possibilidade de aplicação dos conceitos do Controle Estatístico do Processo, estabelecendo-se uma nova metodologia para controle do desempenho de turbinas hidráulicas, que considerava os seguintes elementos básicos como fonte para viabilização deste processo. São eles:

- conhecimento dos resultados dos testes em modelo reduzido;
- transposição dos resultados do modelo para o protótipo, com identificação da variável potência esperada;

- conhecimento das variáveis envolvidas no processo: queda bruta, valor de abertura do distribuidor e potência real gerada;
- construção de um índice de desempenho, dividindo os valores de potência real gerada, pelo valor da potência esperada;
- utilização de gráficos de controle para acompanhamento dos resultados.

1.5 Limites do Trabalho

Em conformidade com os propósitos deste estudo, focalizou-se somente as turbinas hidráulicas do tipo Francis, em especial, as instaladas na Central Hidrelétrica de ITAIPU. O fato de o autor trabalhar na entidade citada e seu envolvimento direto com o assunto, são fatores preponderantes para a escolha deste tema.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido nos seguintes capítulos:

O capítulo 1, esta primeira parte, apresenta o problema da necessidade de realização de ensaios específicos para controle do desempenho de turbinas hidráulicas, e como se pretende abordá-los nos demais capítulos deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica do Controle Estatístico do Processo (CEP) e como utilizá-lo como ferramenta de análise. Inicialmente, é apresentado um breve histórico da qualidade. A seguir é introduzida a teoria básica do CEP e uma revisão dos conceitos estatísticos básicos. Posteriormente são apresentados os principais gráficos de controle utilizados no CEP, assim como, suas características, como construir e analisar.

O capítulo 3 apresenta as ferramentas de análise de comportamento hidráulico de uma turbina. Inicialmente, é apresentada uma caracterização das turbinas em uma central hidrelétrica. Em seguida, apresenta uma caracterização do problema, em especial, a questão da transposição dos resultados modelo para o protótipo. Por fim, é apresentado uma proposta de metodologia que visa construir um índice de desempenho, que possa ser acompanhado através de gráficos de controle.

O capítulo 4 apresenta a entidade ITAIPU BINACIONAL, onde foi realizada a pesquisa, bem como, uma aplicação prática da metodologia proposta no capítulo 3.

Finalmente, no capítulo 5, são colocadas as conclusões e recomendações com relação à metodologia proposta e sua aplicação nas turbinas Francis da ITAIPU BINACIONAL.

Capítulo 2: O CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP) COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE

2.1 Introdução

O Controle Estatístico do Processo é uma ferramenta de análise que tem sido usada naquelas atividades onde se deseja meios de controle da qualidade no ambiente de trabalho.

Os métodos estatísticos não são novos, seus conceitos são conhecidos desde a Revolução Industrial, com a introdução do termo controle de qualidade. Foi, porém, a partir da 2ª Guerra Mundial, quando o exército americano exigiu a adoção do Controle Estatístico da Qualidade para reduzir o número de peças defeituosas fabricadas pela indústria bélica, que a questão envolvendo controle estatístico e qualidade teve um enorme incremento.

Hoje em dia, a teoria original do CEP, além de ter sido impulsionada com sucesso pelos japoneses, seguindo os conceitos introduzidos por Deming e Juran, foi também expandida em seus procedimentos para aumentar sua eficiência, impulsionada pelo trabalho de dois japoneses, Taguchi e Ishikawa.

A seguir será apresentado um breve histórico da qualidade. Na seqüência será introduzida a teoria básica do CEP, uma revisão dos conceitos estatísticos básicos e a questão da construção e análise dos gráficos de controle.

2.2 Histórico da Qualidade

O conceito de qualidade tem sido usado desde o começo dos tempos. A própria evolução do ser humano ao longo do tempo, determinou a evolução do conceito de qualidade. Segundo Paladini (1995), “pode-se dividir a história evolutiva da qualidade em seis períodos, que marcam preocupações, bem definidas e esforços marcantes em busca de melhores produtos, processos e serviços.”

Os seis períodos descritos por Paladini são os seguintes:

- **antigüidade:** período caracterizado pela alta qualidade das artes e extrema precisão da arquitetura na Grécia, pela perfeição das pirâmides e das descobertas fundamentais em Matemática no Egito e pela consistência das construções Romanas, demonstrando preocupação com qualidade;
- **idade média:** período caracterizado pelo aparecimento dos primeiros padrões da qualidade para bens e serviços e níveis básicos de desempenho de mão de obra, a partir do crescimento de pequenas empresas e da diversificação de suas linhas de produção;
- **de 1900 a 1930:** período caracterizado pelo surgimento de procedimentos da avaliação da qualidade de produtos e serviços, com a estruturação de técnicas de inspeção. Inicia-se a industrialização, com organizações maiores e mais complexas. Surgem os primeiros gráficos de controle, desenvolvidos por Walter Shewhart e os métodos de controle estatístico da qualidade em empresas. Surge no início do século o “Journal of the American Statistical Society”, que se mantém até hoje como um dos mais importantes na área da qualidade;
- **décadas de 30 e 40:** período caracterizado pelo desenvolvimento das técnicas estatísticas nos processos produtivos e das técnicas de estruturação dos planos de amostragem; são fixadas as bases do controle estatístico da qualidade; a Segunda Guerra Mundial desencadeou o desenvolvimento de técnicas de inspeção e controle de qualidade; são criados inúmeros grupos de pesquisa em universidades e institutos públicos e privados, sendo fundada a “American Society

for Quality Control”; tornam-se conhecidas as normas do sistema MIL-STD-105, para avaliação da qualidade por atributos, de origem militar;

- anos 50: período de solidificação dos sistemas MIL-STD-105, MIL-STD-414 e H107/108, tabelas de planos de amostragem simples, dupla e múltipla para a avaliação da qualidade por atributos e variáveis e produção contínua; adaptação das normas militares à indústria em geral. Advento da qualidade no Japão e sua enorme popularização, a partir dos trabalhos de Deming e Juran, em 1955, e de Ishikawa, que introduziu as técnicas de controle de processos.
- anos 60, 70 e 80: período caracterizado pelo surgimento do conceito de Controle de Qualidade Total, devido a Armand Feigebaum, com a extensão do conceito de qualidade para toda a empresa, antes restrito ao chão de fábrica; no Japão surge o conceito dos círculos de qualidade, dentro de um modelo que viria mais tarde a ser conhecido como a abordagem participativa da qualidade; surgem os diagramas de causa e efeito e os de controle de variações em processos produtivos, com os métodos de Taguchi (1976/77); o advento do computador facilita o uso de técnicas estatísticas; as leis de proteção ao consumidor mostram a importância que se tem dado ao consumidor.

Como se pode notar o conceito de qualidade foi evoluindo através dos tempos. Nos dias de hoje, além da busca da maior garantia da qualidade ao projeto do produto e da preocupação com os efeitos dos produtos e serviços sobre o meio ambiente, busca-se o desenvolvimento de padrões, ou seja, normalizações internacionais, como é o caso da ISO 9000.

Paladini (1995), lista os seguintes elementos como marca registrada principais de nossa época em termos da qualidade:

1. garantia da qualidade a nível de projeto do produto;
2. efetivação de técnicas e métodos para a garantia da qualidade;
3. ação de produtos e serviços sobre o meio ambiente;
4. estruturação das auditorias da qualidade;
5. abordagem sistêmica da qualidade, com o uso de computadores e outros recursos de informática.

A seguir apresenta-se a visão da qualidade segundo alguns dos maiores especialistas no assunto:

- Feigenbaum: “Qualidade quer dizer o melhor para certas condições do cliente. Essas condições são: o verdadeiro uso e o preço de venda”;
- Campos: “Um produto e serviço com qualidade é aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, de forma acessível, de forma segura e no tempo certo às necessidades do cliente”;
- Ishikawa: “Qualidade significa busca contínua das necessidades do consumidor, através de: qualidade do produto, serviço, administração, pessoas, atendimento e prazo certo”.

Na tabela 2.1 , a seguir, apresentam-se as características principais de 3 filosofias que são universalmente reconhecidas, com relação à qualidade. Os seus autores são, respectivamente, Philip B. Crosby, Joseph M. Juran e W. Edwards Deming .

CROSBY	JURAN	DEMING
<ul style="list-style-type: none"> Qualidade é definida simplesmente em função da conformidade às especificações. Condição padrão da Qualidade é de "defeito zero". Estratégia administrativa é de prevenção ao invés de correção, ou seja, se concentrar em encontrar os defeitos antes que ocorram, evitando corrigi-los depois de ocorridos. Medição da qualidade é Custo da Qualidade. Apresenta a mais estruturada estratégia de administração da Qualidade. O seu plano de melhoria do processo da Qualidade é baseado nos Seguintes pontos: <ol style="list-style-type: none"> Comprometimento da administração; time de melhoria da qualidade; medição da qualidade; avaliação dos custos da qualidade; consciência; ação corretiva; planejamento de defeito zero; educação para a qualidade; dia do defeito zero; plano de metas; remoção das causas dos defeitos; reconhecimento; conselhos da qualidade; fazer tudo de novo novamente. Acredita na necessidade absoluta do total envolvimento da alta administração nos programas de qualidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Qualidade é definida como adequação ao uso; Caracteriza a qualidade com o termo inovação; Acredita que é preciso trabalhar para quebrar o muro do preconceito, para desenvolver uma atmosfera de cooperação e entendimento. Desenvolveu uma seqüência de atividades para a melhoria da Qualidade. Esta seqüência é dividida em duas viagens: <ol style="list-style-type: none"> do sintoma para a causa; da causa para a solução. <ul style="list-style-type: none"> São identificados pontos críticos ao longo de cada viagem, a fim de se manter o controle e a direção; Sugere a criação de comitês permanentes e temporários, os chamados braços de guia e de diagnóstico. Foco da filosofia é a média gerência; É fortemente orientada para as necessidades e expectativas dos clientes. Mudança de atitude deve ser o primeiro passo para estabelecer um efetivo programa de CEP. Acredita que é necessário o engajamento de todos para a melhoria dos programas de qualidade, inclusive a alta administração. Treinamento em CEP deve ser providenciado para todos na empresa. 	<ul style="list-style-type: none"> A Qualidade é atendimento às necessidades atuais e futuras do consumidor. Baseada num programa que contém 14 pontos: <ol style="list-style-type: none"> criar constância de objetivos para melhoria do produto e serviço; adotar nova filosofia de recusa para perseguir defeitos; cessar dependência da inspeção em massa e refugar somente com controle estatístico; exigir dos fornecedores que tenham evidências estatísticas da qualidade; aumentar produção e serviços constantemente e para sempre; treinar todos os empregados; prover a todos os empregados as ferramentas apropriadas para fazer o trabalho corretamente; encorajar comunicação e produtividade; encorajar diferentes departamentos a trabalharem juntos na resolução dos problemas; eliminar cartazes e slogans que não ensinam especificadamente melhoria nos métodos; usar métodos estatísticos para continuamente melhorar a qualidade e produtividade; eliminar todas as barreiras de ter orgulho de trabalhos manuais; prover novamente treinamento para pegar mudanças dos métodos e produtos; definir claramente a presença da alta gerência no compromisso com a qualidade.

Tabela 2.1: Características da filosofia da qualidade, segundo Crosby, Juran e Deming

Doty (1990), relacionou diversas formas de como a qualidade pode ser definida:

- qualidade estatística
 - relaciona-se com as demais, porém, pode ser definida de acordo com o método estatístico utilizado;
- qualidade como adequação ao uso
 - identificar o que o consumidor considera importante no produto;
- qualidade do projeto
 - produzir o produto desejado pelo cliente;
- qualidade do processo
 - habilidade de produzir o produto especificado dentro dos padrões;
- qualidade em função da relativa utilidade
 - qualidade nunca pode ser medida precisamente;
- qualidade em função de conhecimento das necessidades funcionais
 - mudanças dos projetos para viabilizar todos os possíveis usos;
- qualidade em função de conhecimento dos objetivos funcionais num menor espaço de tempo, esforço e custo.
 - considerar os efeitos funcionais nos requerimentos da qualidade;
- qualidade em função das expectativas dos clientes
 - as diferenças das expectativas tornam a sua medida extremamente dificultosa, às vezes impossível.

Em geral, a condição básica para o sucesso da qualidade é o total comprometimento da administração nas idéias e objetivos. Isto se refere ao envolvimento de todas as pessoas envolvidas no processo desde a alta administração até o pessoal de base.

2.3 Controle Estatístico do Processo

O Controle Estatístico do Processo ou CEP, desenvolvido por Shewhart, é uma metodologia gráfica que determina rapidamente quando o processo está fora do controle, sendo o processo então investigado para determinar as causas dessa condição anormal.

Controle Estatístico do Processo, segundo Grant e Leavenworth (1980), “é um método estatístico para análise das características dos produtos a fim de determinar a probabilidade de melhoramentos que podem ser feitos no processo para reduzir variabilidade e conseguir maior qualidade”.

Neste trabalho o CEP será definido como um processo preventivo de análise contínua de um sistema real, com o propósito de identificar, a partir de dados estatísticos, o comportamento do sistema e avaliar estratégias para melhoria do processo.

O CEP será considerado como uma filosofia de trabalho, ou seja, um instrumento para a construção de um modelo que possibilite prevenir a tempo um possível problema. Assim pode-se pensar no CEP como uma metodologia experimental e prática, com a finalidade de verificar-se os seguintes aspectos:

- conhecimento do processo;
- fidelidade dos dados coletados representados pelos gráficos de controle;
- estabelecimento de critérios para verificar qual é o comportamento das mudanças de condições operativas calculadas pelo CEP, ou seja, verificar se estas alterações são causadas por variações inerentes ao sistema e se serão estáveis através do tempo ou se ocorrem ocasionalmente;

2.3.1 A Teoria Básica do CEP

A teoria básica do CEP diz que inevitavelmente existirão variações de uma amostra de um produto para outro, visto que não existem dois produtos ou duas características exatamente iguais. As diferenças sempre existem, embora às vezes não possam ser medidas. As causas das variações no processo, podem ser divididas em dois grandes grupos:

- **causas comuns:** são aquelas variações inerentes a um processo que se encontra sob controle estatístico, podendo ser difíceis de identificar, porém, fazem parte de um sistema constante de variação. Nestes casos não é conveniente, técnica e economicamente, eliminar as causas de imediato.
- **causas especiais:** são aquelas cujas fontes de variações são relativamente grandes, sendo, porém, identificáveis e, ocorrem fora do sistema constante de variação.

O processo é dito estável quando apenas causas comuns afetam o processo, ou seja, as variações são somente inerentes ao processo.

Segundo Grant e Leavenworth (1980), " variações que são maiores que as variações que acontecem a curto prazo e aquelas que só aparecem em um tempo longo, devem acontecer devido a causas especiais e devem ser corrigidas."

O CEP é baseado em amostras dos produtos e do banco de dados resultantes das medições. Gráficos são feitos em função dos bancos de dados para ajudar na análise. A chave para operação dos cálculos e gráficos no CEP é a premissa de que a chance de que as variações inerentes ao processo afetarão todas as medidas e que serão estáveis com o passar do tempo.

Outro conceito de CEP, segundo Hess e Bright (1988), " é que o controle da qualidade do produto deve apontar para um valor, em lugar de simplesmente ficar dentro de limites de especificações."

Na figura 2.1, a seguir, o gráfico mostra que os limites para o produto foram acertados para ficarem entre 60% e 62%. Se o resultado estiver dentro dos limites, o produto é considerado aceitável.

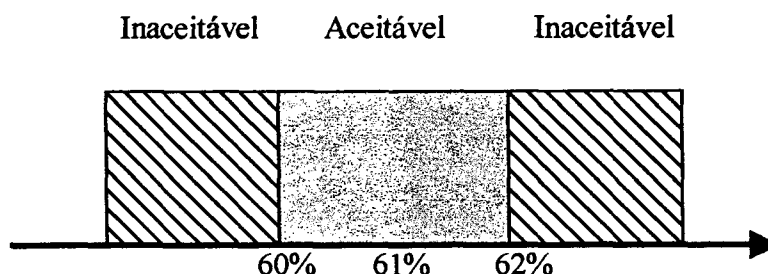


Figura 2.1: Produto com limites de especificação

Já na figura 2.2, o gráfico mostra que o objetivo é conseguir o valor de 61%. Embora o produto possa ser aceitável dentro dos limites, é desejável que se consiga que o valor resultante seja o mais próximo possível do melhor.

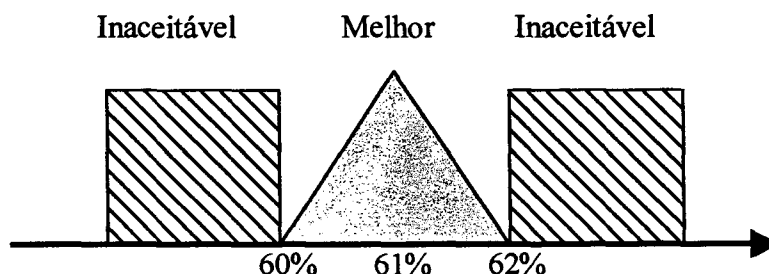


Figura 2.2: Produto com limites de especificação, porém, com indicativo de meta

2.3.2 Revisão dos Conceitos Estatísticos Básicos

Para se aplicar os princípios do CEP é necessário que se tenha uma noção dos conceitos estatísticos básicos, principalmente com relação aos seguintes pontos:

- diferenças principais entre um universo e uma amostra e entre parâmetros e estatística;
- diferenças entre medidas de tendência central e medidas de dispersão, bem como ser capaz de calcular esses valores;

A seguir serão apresentados os tópicos relacionados com os pontos indicados anteriormente.

1. Universo e amostra

Segundo Doty (1990), um universo (ou uma população) é uma coleção de todos os possíveis valores, enquanto uma amostra é somente uma pequena quantia desses valores coletados aleatoriamente. Como por exemplo pode-se citar:

- todas as turbinas de uma Usina Hidrelétrica é um universo;
- um grupo de turbinas de uma Usina Hidrelétrica, escolhidas aleatoriamente, é uma amostra.

O procedimento de inferência estatística, considera que a medida das características de um universo é inferida pelas medidas de mesma características de uma amostra.

Outra regra importante para as amostras estatísticas é que ela deve ser imparcial.

Segundo Doty (1990), três condições devem ser completadas para atender esta situação:

- a) a amostra deve ser escolhida aleatoriamente. Isto significa que cada item do universo tem a mesma chance de ser escolhido para a amostra;
- b) a amostra deve ser homogênea. Isto significa que todos os grupos da amostra devem ser representados com a mesma proporção com as quais ocorrem no universo;
- c) a amostra deve ser independente. Isto significa que a seleção de qualquer item não afeta a probabilidade de que qualquer outro item possa ser escolhido. Caso ocorra dependência, técnicas especiais de estatística devem ser usadas para se calcular apropriadamente as probabilidades.

2. Parâmetros e estatística

Segundo Doty (1990), parâmetro é uma medida da característica do universo e estatística é a medida da característica da amostra do universo. Como por exemplo pode-se citar:

- a média do tempo de operação de todas as turbinas de uma Usina Hidrelétrica é um parâmetro;
- a média do tempo de operação de algumas turbinas de uma Usina Hidrelétrica, escolhidas aleatoriamente, é uma estatística.

Ainda, segundo Doty (1990), " idealmente, estatísticas deveriam se assemelhar e aproximar dos parâmetros de universo que eles representam. "

A American Society for Quality Control - ASQC, utiliza os seguintes símbolos para representar média e desvio padrão, características principais mais utilizadas em controle de qualidade, e que são calculadas em relação à amostra ou ao universo:

- média:
 - universo: μ
 - amostra: \bar{X}
- desvio padrão
 - universo: σ
 - amostra: s

3. Medidas de tendência central

Segundo Doty (1990), " a tendência central é um valor central ou próximo de outros valores que divirjam de alguma forma de um valor padrão. Se a tendência é forte, os valores ou medidas se agruparão muito proximamente do valor central. Se a tendência é fraca, os valores ou medidas não se agruparão proximamente do valor central, porém, muitos valores estarão a uma grande distância.

Os três principais tipos de valores centrais são:

- **média aritmética:** é a soma de todos os valores (ou medidas) divididos pelo número total de valores. As fórmulas podem variar de acordo como são apresentadas, ou de acordo como os dados estão organizados.

A fórmula geral pode ser apresentada das seguintes formas:

a) **básica:**

$$\bar{X} = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) / n$$

onde: \bar{X} = média aritmética;
 n = número de observações ou medições;
 X_1 , etc. = o valor individual de cada observação.

b) **matemática:**

$$\bar{X} = \sum_{j=1}^n X_j / n$$

onde: X_j = valor da j -ésima medição.

A fórmula para dados agrupados é a seguinte:

$$\bar{X} = \sum_i (f_i X_i) / n$$

onde: \bar{X} = média aritmética;
 X_i = valor individual de uma célula;
 $n = \sum f$ = número total de observações;
 f_i = número de observações dentro de cada célula;

- **moda:** é o valor que ocorre com mais frequência.

- mediana: é o valor que está equidistante entre o maior e o menor valor. A fórmula para dados contínuos arranjados em células é a seguinte:

$$Md = L_m + i(n/2 - cf_m)/f_m$$

onde: Md = a mediana;
 n = número total de observações;
 cf_m = frequência acumulada de todas as células abaixo de L_m;
 f_m = frequência da célula central;
 i = intervalo entre células;
 L_m = limite inferior da célula central.

4. Medidas de dispersão

Segundo Doty (1990), " dispersão se refere ao princípio que causa a variação dos valores em torno do valor central." Ela é a variabilidade da distribuição ou a tendência de ser diferente. Os três tipos principais das medidas da variabilidade são:

- amplitude (range) : É a diferença entre o menor e o maior valor medido. A fórmula é a seguinte:

$$R = X_h - X_l$$

onde: X_h = o maior valor medido;
 X_l = o menor valor medido.

- desvio padrão: É a medida de dispersão mais útil e mais utilizada em estatística.

Segundo a ASQC (1983), desvio padrão é definido como: " a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os valores individuais e a média, dividido pelo número de valores."

Já Doty (1990), define desvio padrão como "uma medida média da distância de que os valores divergem da média ou da média aritmética."

Entre grupos com grandes medições, certos valores se desviarão da média por grandes quantias se comparados com outras medidas. O desvio padrão de um jogo de números é uma medida estatística da dispersão dos números. As fórmulas principais para o desvio padrão são:

a) fórmula básica:

$$s = \sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 / (n-1)}$$

onde: s = desvio padrão;
 X = valor individual;
 \bar{X} = média aritmética;
 n = número de observações ou medições;

b) fórmula da soma dos quadrados

$$s = \sqrt{[\sum X^2 - (\sum X)^2 / n] / (n-1)}$$

c) fórmula para dados agrupados

$$s = \sqrt{[\sum (fX^2) - (fX)^2 / n] / (n-1)}$$

- variância (s^2): É simplesmente o valor do desvio padrão ao quadrado.

5. A curva normal

A Curva Normal ou Gaussiana é a distribuição de probabilidade mais importante e a mais utilizada em toda a estatística. No CEP, ela é a base da fundamentação teórica para todos os gráficos de controle (Doty,1990).

A curva normal é bastante diferenciada em sua forma. A forma característica da curva normal é o que a faz ser conhecida como a curva em forma de sino. O que distingue uma curva normal de outra é a característica das distribuições de frequência.

A figura 2.3, a seguir, mostra um exemplo de curva normal onde a média (μ) é 2,5 e o desvio padrão (σ) é 1,0.

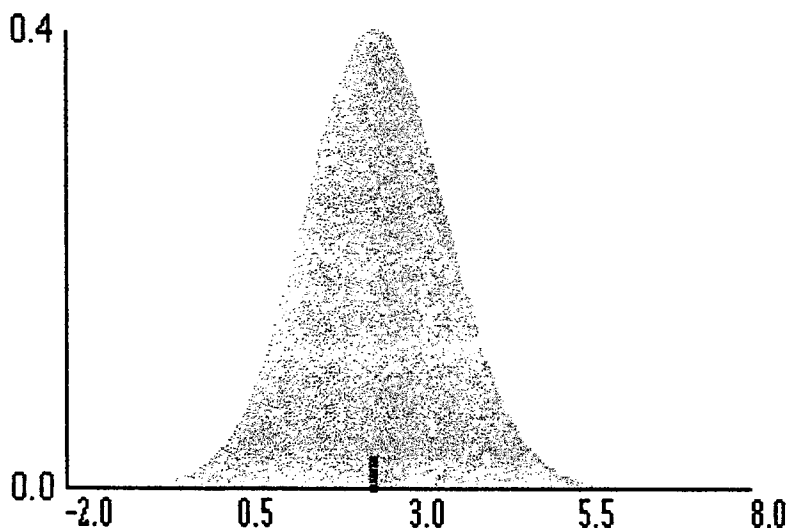


Figura 2.3: Curva Normal ($\mu = 2,5$; $\sigma = 1,0$)

A função para determinação da área abaixo da curva normal é a seguinte:

$$f(X) = \left[1 / \sigma \sqrt{2\pi} \right] \left\{ \exp \left[- (X - \bar{X})^2 / 2\sigma^2 \right] \right\} \text{ ou}$$

$$f(X) = \left[1 / \sqrt{2\pi} \right] \left[\exp(-Z^2 / 2) \right]$$

A área abaixo da curva normal pode, então, ser calculada utilizando técnicas de cálculo integral, ou através das tabelas que localizam o valor de Z, as chamadas tabelas de probabilidade Z. Este valor de Z é simplesmente o número de desvios padrões desde a média, podendo ser calculado pela seguinte fórmula:

$$Z = (X - \mu) / \sigma$$

onde: Z = valor normal tabelado;
 X = observação individual ou medida;
 μ = média aritmética do universo;
 σ = desvio padrão do universo.

O uso da curva normal em conjunto com a fórmula do valor de Z é extensivamente utilizada em estatística como um veículo de transformação para determinar a área abaixo da curva, ou seja, percentuais de itens ou probabilidades.

A figura 2.4, a seguir, ilustra o relacionamento da curva normal com os gráficos de controle de qualidade.

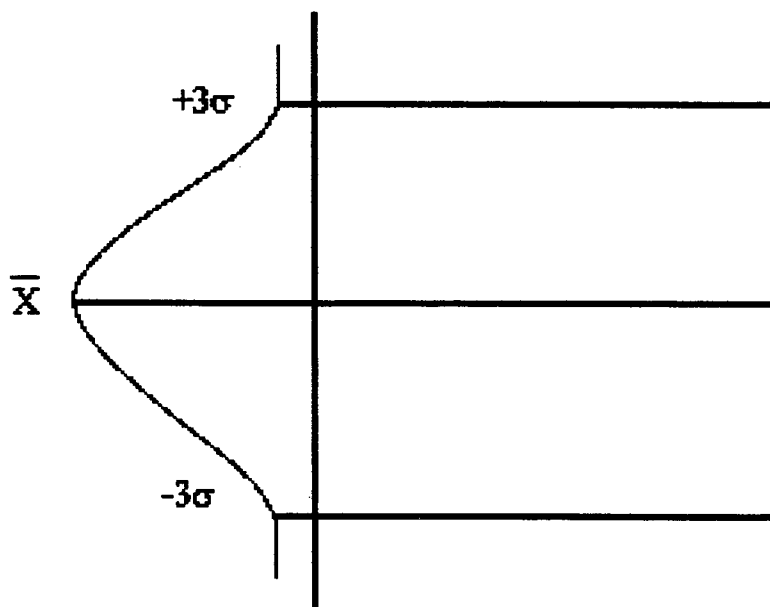


Figura 2.4: Curva mostrando relacionamento da Curva Normal com gráfico de controle de qualidade

2.3.3 Construção dos Gráficos de Controle

Segundo Doty (1990), o primeiro gráfico de controle foi proposto em 1924, por W. A. Shewhart, estatístico americano, que trabalhando no "Bell Telephone Laboratories", desenvolveu um gráfico estatístico para controle e ajuste de uma variação anormal, distinguindo variações devidas a causas especiais daquelas devidas a causas comuns.

O gráfico de Shewhart introduziu o desenho dos limites de controle inferiores e superiores, LCI e LCS, respectivamente, determinados em relação a 3 (três) desvios padrões abaixo e acima da média. Quando o processo ultrapassasse estes limites era considerado como estando fora do controle estatístico.

Basicamente, os gráficos de controle, são gráficos de medição de uma ou mais características importantes de um produto.

Segundo Doty (1990), os passos para a construção de um gráfico de controle são os seguintes:

- selecionar a característica da qualidade

A seleção da característica da qualidade a ser escolhida para análise por gráfico de gráfico de controle, depende das características do produto que se queira controlar.

- desenvolver um plano de inspeção

O objetivo do plano de inspeção é de se estabelecer um roteiro ou método para as medições e estabelecer a viabilidade econômica entre o custo da medição com o valor da medição esperado do produto e da satisfação do cliente.

- selecionar um tipo de gráfico de controle

A escolha do gráfico de controle apropriado (variável ou atributo) dependerá da natureza da medição e dos custos envolvidos. As características e os tipos principais dos gráficos de controle por variáveis e por atributos serão apresentados a seguir.

- escolher tamanho apropriado da amostra;

O tamanho da amostra depende do método de análise que está sendo utilizado, o custo e o tempo considerado. Para ser estatisticamente viável, o tamanho da amostra deve consistir de 100 ou mais medidas ou observações.

Um tamanho de amostra normal usado para gráficos de controle por variáveis é composto usualmente por 25 subamostras de quatro ou cinco itens cada. O tamanho da subamostra pode variar de acordo com o grau de precisão desejado.

De acordo como os dados são tabulados, na vertical ou na horizontal, é possível se determinar o valor da média e amplitude de cada amostra, que forma um subgrupo.

- coletar os dados

Qualquer amostra deve ser independente, randômica e homogênea, para representar apropriadamente as características da população.

- determinar os limites de controle tentativos

Os limites de controle são aqueles valores que estão mais ou menos 3σ do valor médio, com 99,73 % de chances de todas as medidas estarem dentro desta faixa.

- determinar os limites de controle revisados

Os limites de controle revisados são calculados após se verificar que uma amostra está fora de controle. Este valor é então descartado e calculado novamente os limites de controle com as amostras restantes.

- construir e revisar o gráfico de controle

Todos os gráficos de controle são baseados na curva normal básica (Gaussiana). Utiliza-se software estatístico próprio para cada tipo de gráfico desejado.

- continuar usando o gráfico.

Os gráficos de controle representam uma figura contínua do processo de qualidade e provém fundamentos para a qualidade e melhoria do processo.

De um modo geral pode-se dividir os Gráficos de Controle em dois grandes grupos:

a) gráficos de controle para variáveis

Variáveis são aqueles dados que podem ser medidos, ou tem característica contínua.

Em controle de qualidade, a variável é uma característica contínua e difere de um atributo naquilo que é medido. A seguir apresentam-se os tipos principais de gráficos de controle para variáveis:

- gráfico \bar{X} e R (média e amplitude)

Segundo Kume (1988), o gráfico \bar{X} e R é usado para controlar e analisar um processo usando valores contínuos de qualidade do produto e fornece a maior quantidade de informação no processo. Em geral este tipo de gráfico é utilizado para os casos em que

o tamanho da amostra é menor do que 6 ($n < 6$). As fórmulas básicas para a construção dos gráficos \bar{X} e R são as seguintes:

$$\bar{X} = \sum X / n$$

$$R = X_h - X_l$$

$$\bar{\bar{X}} = \sum \bar{X} / m$$

$$\bar{R} = \sum R / m$$

$$\text{- gráfico da média} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{LSCX} = \bar{\bar{X}} + A_2 * \bar{R} \\ \text{LMCX} = \bar{\bar{X}} \\ \text{LICX} = \bar{\bar{X}} - A_2 * \bar{R} \end{array} \right.$$

$$\text{- gráfico da amplitude:} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{LSCR} = D_4 * \bar{R} \\ \text{LMCR} = \bar{R} \\ \text{LICR} = D_3 * \bar{R} \end{array} \right.$$

onde:	$\bar{\bar{X}}$	=	média da média da subamostra;
	\bar{R}	=	média das amplitudes da subamostra;
	n	=	tamanho da subamostra;
	m	=	número de subgrupos;
	LSCX	=	limite superior de controle do gráfico \bar{X}
	LMCX	=	limite médio de controle do gráfico \bar{X}
	LICX	=	limite inferior de controle do gráfico \bar{X}
	LSCR	=	limite superior de controle do gráfico R
	LMCR	=	limite médio de controle do gráfico R
	LICR	=	limite inferior de controle do gráfico R

Os valores de A_2 , D_3 e D_4 , são fatores obtidos através de tabelas adequadas, usadas para converter a amplitude dos subgrupos para limites 3σ . (ver anexo i).

Um conceito importante é que aquelas variações das medições individuais dentro de um subgrupo é devido a variações inerentes ou efeitos randômicos. Assim como o gráfico

de Shewhart, o gráfico \bar{X} e R, também indica que o processo não está sobre controle estatístico quando um valor de \bar{X} cai fora de qualquer limite de controle.

A figura 2.5, a seguir, mostra um exemplo de um gráfico \bar{X} e R:

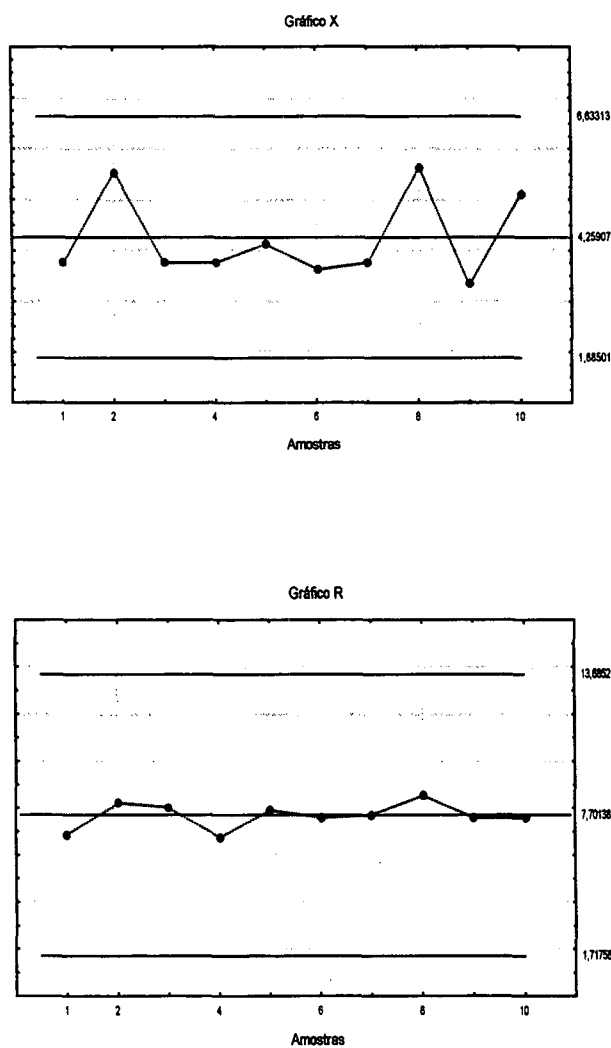


Figura 2.5: Gráfico tipo \bar{X} e R

- gráfico \bar{X} e s (média e desvio padrão)

Em geral este tipo de gráfico é utilizado para os casos em que o tamanho da amostra é muito grande ($n > 6$). As fórmulas básicas para a construção dos gráficos \bar{X} e s são as seguintes:

$$\bar{X} = \sum X/n$$

$$s = \sqrt{[\sum X^2 - (\sum X)^2 / n] / (n - 1)}$$

$$\bar{\bar{X}} = \sum \bar{X}/m$$

$$\bar{s} = \sum s/m$$

$$\begin{array}{l} \text{- gráfico da média} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{LSCX} = \bar{\bar{X}} + A_3 * \bar{s} \\ \text{LMCX} = \bar{\bar{X}} \\ \text{LICX} = \bar{\bar{X}} - A_3 * \bar{s} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{- gráfico do desvio padrão} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{LSCs} = B_4 * \bar{s} \\ \text{LMCs} = \bar{s} \\ \text{LICs} = B_3 * \bar{s} \end{array} \right.$$

onde:	$\bar{\bar{X}}$	=	média da média do subamostra;
	\bar{s}	=	média dos desvios padrões da subamostra;
	n	=	tamanho da subamostra;
	m	=	número de subgrupos;
	LSCX	=	limite superior de controle do gráfico \bar{X}
	LMCX	=	limite médio de controle do gráfico \bar{X}
	LICX	=	limite inferior de controle do gráfico \bar{X}
	LSCs	=	limite superior de controle do gráfico s
	LMCs	=	limite médio de controle do gráfico s
	LICs	=	limite inferior de controle do gráfico s

Os valores de A_3 , B_3 e B_4 , são fatores obtidos através de tabelas adequadas, usadas para converter os desvios padrões das subgrupos para limites 3σ , (ver anexo i).

A figura 2.6, a seguir, mostra um exemplo de um gráfico \bar{X} e s:

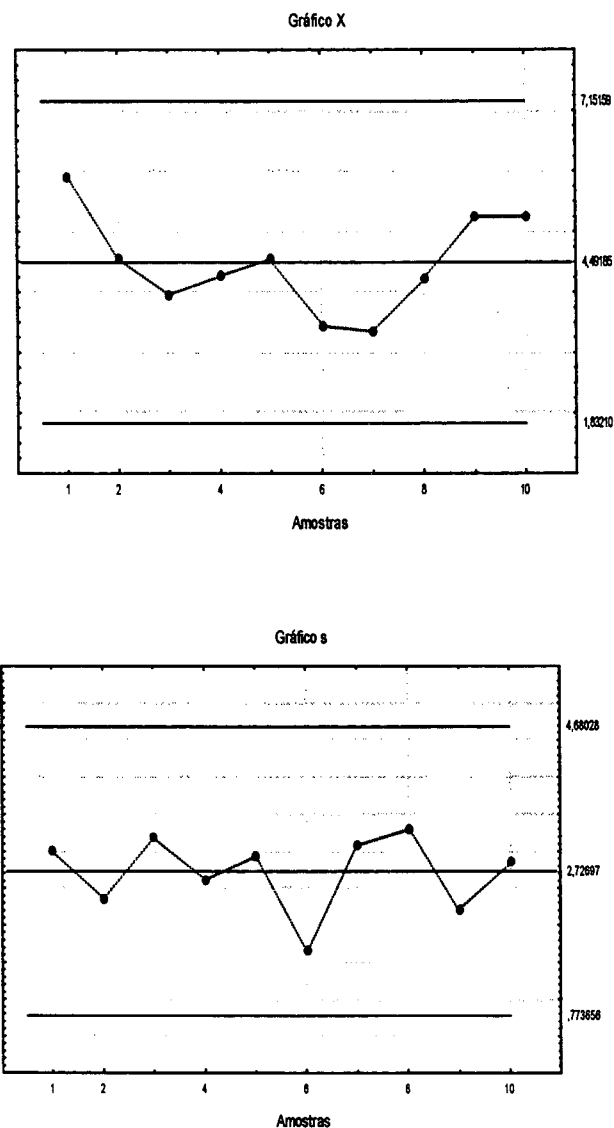


Figura 2.6: Gráfico tipo \bar{X} e s

- gráfico MA e MR (média móvel e amplitude móvel)

Segundo Doty (1991), o gráfico MA e MR é designado para períodos curtos de produção, embora possa também ser utilizado para processos longos de produção. Este tipo de gráfico é equivalente ao gráfico X-R. A média móvel pode ser calculada para cada duas, três, quatro ou mais medidas, porém, o número de medidas a ser escolhido deve ser aquele que proporcione um gráfico o mais realista possível.

As fórmulas básicas para a construção dos gráficos MA e MR são as seguintes:

$$MA = \sum X / n$$

$$MR = X_h - X_l$$

$$\overline{MA} = \sum MA / (m - n + 1)$$

$$\overline{MR} = \sum MR / (m - n + 1)$$

- gráfico da média móvel
$$\begin{cases} UCL_{MA} = \overline{MA} + A_2 * \overline{MR} \\ LCL_{MA} = \overline{MA} - A_2 * \overline{MR} \end{cases}$$

- gráfico da amplitude móvel
$$\begin{cases} UCL_{MR} = D_4 * \overline{MR} \\ LCL_{MR} = D_3 * \overline{MR} \end{cases}$$

onde:	MA	=	média móvel das n medidas;
	MR	=	amplitude móvel;
	\overline{MA}	=	média das médias móveis;
	\overline{MR}	=	média das amplitudes móveis;
	UCL_{MA}	=	limite superior de controle do gráfico MA
	LCL_{MA}	=	limite inferior de controle do gráfico MA
	UCL_{MR}	=	limite superior de controle do gráfico MR
	LCL_{MR}	=	limite inferior de controle do gráfico MR

Os valores de A_2 , D_3 e D_4 , são fatores obtidos através de tabelas adequadas, usadas para converter a amplitude dos subgrupos para limites 3σ , (ver anexo i).

A figura 2.7, a seguir, mostra um exemplo de um gráfico MA e MR:

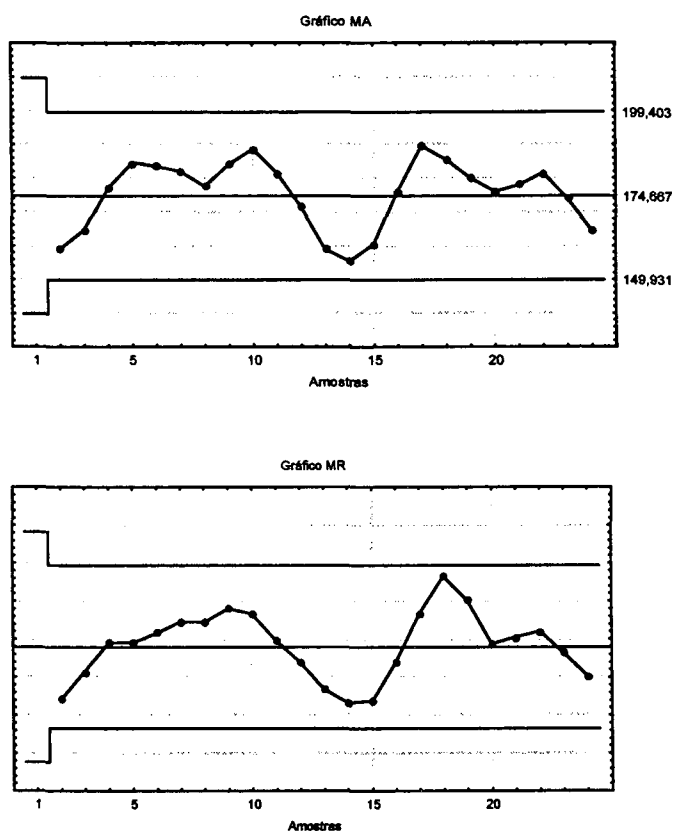


Figura 2.7: Gráfico tipo MA e MR

b) gráficos de controle para atributos

Atributos, são os dados que só podem ser contados ou classificados, ou tem característica discreta.

Os gráficos de controle por atributos são utilizados nos casos onde não é possível realizar medições e, principalmente, quando ocorre uma ou mais das seguintes condições:

- o número de características a controlar em cada peça é elevado;
- em lugar de medições, só é viável o uso de calibradores tipo passa não passa;
- medição do característico é antieconômico ou demorado;

- a verificação da qualidade é feita por simples inspeção visual, onde o característico a ser controlado insere-se numa classificação do tipo bom ou ruim, sim ou não, presente ou ausente, conforme ou não conforme, etc. .

A seguir apresentam-se os tipos principais de gráficos de controle para atributos:

- gráfico da proporção (fração) de defeituosos ou “p”

O gráfico p é baseado na aproximação da curva normal para a binomial. Um valor de $p = 0,10$, significa que 10 % das partes são defeituosas e que cada parte tem 10 % de probabilidade ser defeituosa. Ele é usado para a percentagem de unidades não conformes. As amostras não necessitam ser de tamanho constante. As fórmulas para a construção dos limites de controle do gráfico p são:

$$p = np / n$$

$$\bar{p} = \sum np / \sum n$$

$$LSCp = \bar{p} + 3 * \sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p}) / n}$$

$$LICp = \bar{p} - 3 * \sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p}) / n}$$

onde: p = fração defeituosa (probabilidade de ser defeituosa),
 np = número de defeituosos;
 n = tamanho do subamostra;
 \bar{p} = média dos valores de p;
 LSCp = limite de controle superior;
 LICp = limite de controle inferior.

A figura 2.8, a seguir, apresenta um exemplo de gráfico p.

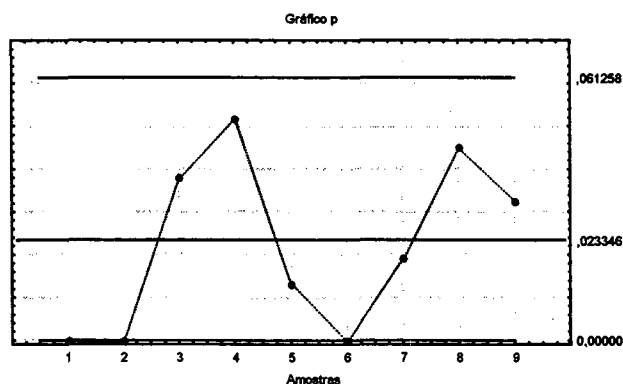


Figura 2.8: Gráfico tipo p

- gráfico do número total de defeituosos ou “np”

O gráfico np é uma adaptação do gráfico p, que tem a vantagem de ser melhor entendido pelo pessoal da produção, visto que todos os valores são mostrados por unidades de defeituosos ao invés de frações. A amostra deve ter tamanho constante. As fórmulas para a construção dos limites de controle do gráfico np são:

$$\bar{p} = \sum np / \sum n$$

$$LSCnp = n\bar{p} + 3 * \sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})}$$

$$LICnp = n\bar{p} - 3 * \sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})}$$

onde: np = número de defeituosos;
n = tamanho da subamostra;
 \bar{p} = média dos valores de p;
LSCnp = limite de controle superior;
LICnp = limite de controle inferior.

A figura 2.9, a seguir, apresenta um exemplo de gráfico np.

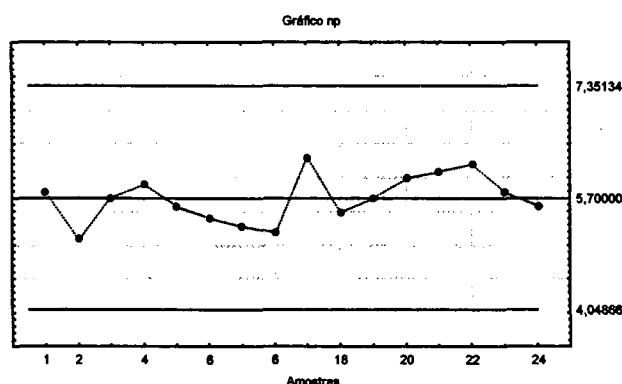


Figura 2.9: Gráfico tipo np

- gráfico de defeitos por unidade ou “u”.

O gráfico u controla a média dos defeitos por unidade para amostras de tamanhos pequenos e é também chamado de gráfico da média dos defeitos por unidade. O valor central do gráfico u é o próprio valor de u. O produto não necessariamente deve ter o mesmo tamanho, pode ser variável. As fórmulas para a construção dos limites de controle do gráfico u são as seguintes:

$$u = c / n$$

$$\bar{u} = \sum c / \sum n = \sum c / \sum nm$$

$$LSCu = \bar{u} + 3 * \sqrt{\bar{u} / n}$$

$$LICu = \bar{u} - 3 * \sqrt{\bar{u} / n}$$

onde:

c	=	número de defeitos por unidade;
n	=	tamanho da amostra;
m	=	número de subamostras;
\bar{u}	=	média dos defeitos por unidade;
LSCu	=	limite de controle superior;
LICu	=	limite de controle inferior.

A figura 2.10, a seguir, mostra um exemplo de gráfico u.

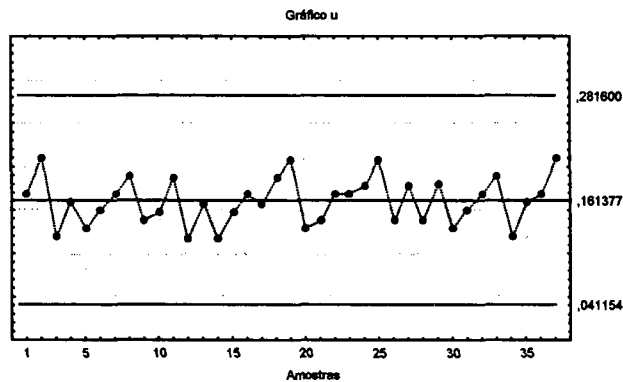


Figura 2.10: Gráfico tipo u

- gráfico de número de defeitos na amostra ou “c”

O gráfico c é uma adaptação do gráfico u. O gráfico c é um caso especial do gráfico u para grandes unidades, onde é mais prático usar uma unidade simples como tamanho da amostra. Controla a número de defeitos de uma unidade. As fórmulas para a construção dos limites de controle do gráfico c são as seguintes:

$$\bar{c} = \sum c / \sum n = \sum c / \sum m$$

$$LSCc = \bar{c} + 3 * \sqrt{\bar{c}}$$

$$LICc = \bar{c} - 3 * \sqrt{\bar{c}}$$

onde:

c	=	número de defeitos por unidade;
n	=	tamanho de amostra 1;
m	=	unidades inspecionadas;
LSCc	=	limite de controle superior;
LICc	=	limite de controle inferior.

A figura 2.11, a seguir, mostra um exemplo de gráfico c.

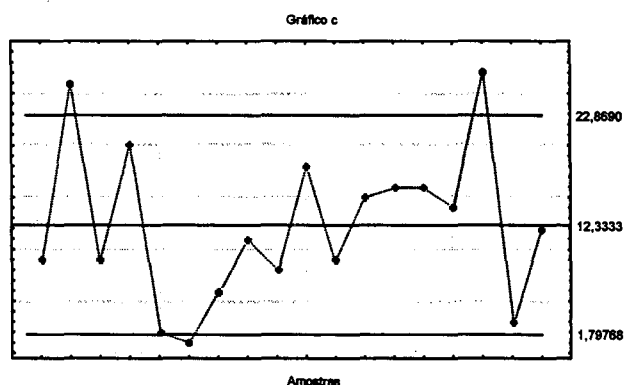


Figura 2.11: Gráfico tipo c

2.3.4 Análise dos Gráficos de Controle

Segundo Kume (1988), o mais importante no controle de processo é compreender o estado do processo com precisão, lendo o gráfico de controle e tomando medidas apropriadas prontamente quando alguma coisa extraordinária for encontrada no processo.

Considerando-se as Causas Comuns e as Causas Especiais, pode-se realizar a análise da distribuição dos pontos locados no gráfico, verificando se um processo está num estado controlado ou não. Os critérios, deduzidos dos gráficos de controle, para se identificar as possíveis condições em que o processo está fora do controle estatístico são os seguintes:

- **variação extrema:** caracterizada pela presença de um ou mais pontos fora dos limites de controle.
- **desvios:** caracterizada por mostrar os pontos dentro dos limites de controle, porém, o processo está fora do controle estatístico. É a situação em que os pontos aparecem continuamente de um lado da linha central. Os

seguintes casos de seqüências de pontos podem ser considerados anormais:

- de 6 a 8 pontos acima ou abaixo da linha média;
- qualquer grupo de 4 a 5 pontos consecutivos na região de 2 e 3 sigmas;
- 10 de 11 pontos consecutivos estão acima ou abaixo da linha média;
- 12 de 14 pontos consecutivos estão acima ou abaixo da linha média;
- 16 de 20 pontos consecutivos estão acima ou abaixo da linha média.

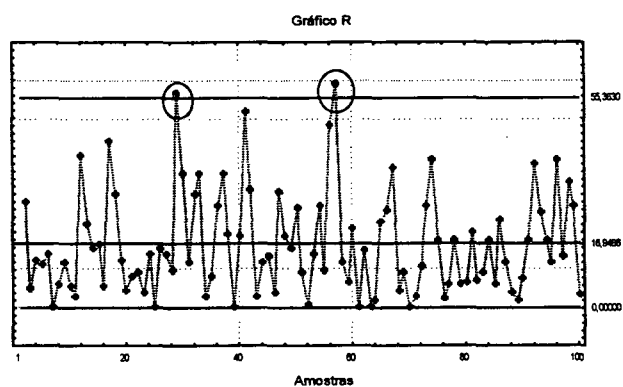


Figura 2.12: Gráfico de controle mostrando variações extremas

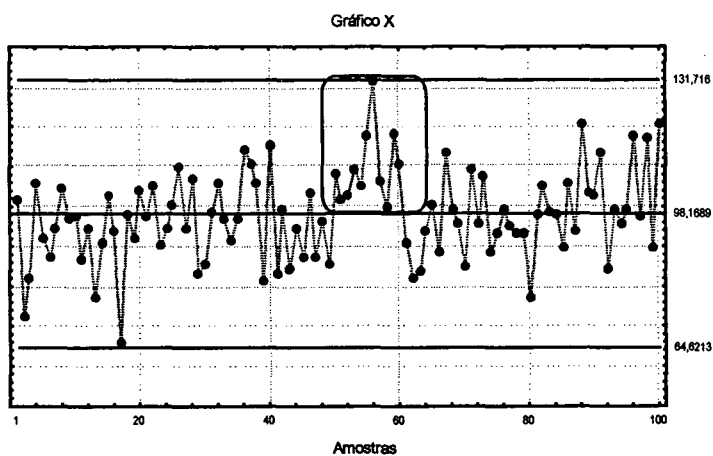


Figura 2.13: Gráfico de controle mostrando desvios

- **tendência:** caracterizado por presença de pontos, consecutivos ou não, numa seqüência ascendente ou descendente, caracterizando uma tendência.

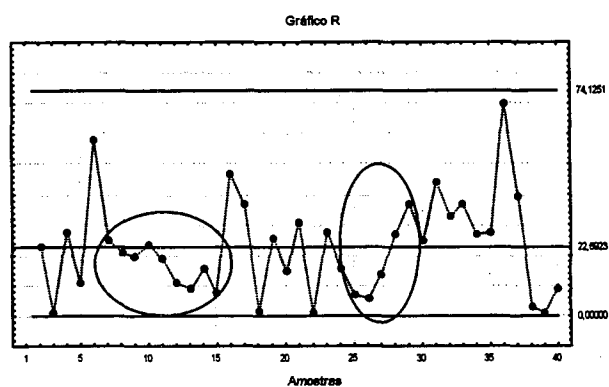


Figura 2.14: Gráfico de controle mostrando tendências

- **ciclos:** caracterizado por presença de pontos que se repetem mostrando picos e vales.

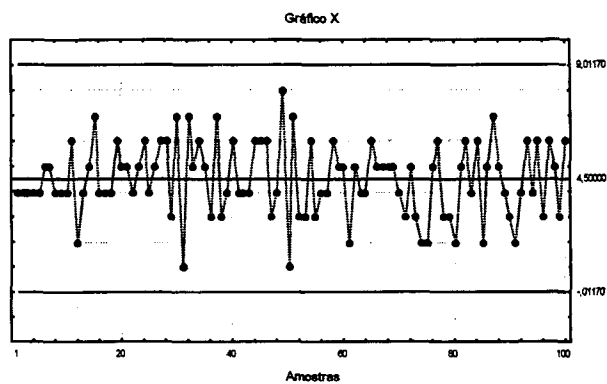


Figura 2.15: Gráfico de controle mostrando ciclos

- falta de variabilidade : caracterizado por presença de pontos que permanecem muito próximos da linha central. Indicam medições tendenciosas ou seleção imprópria de subgrupos de amostras.

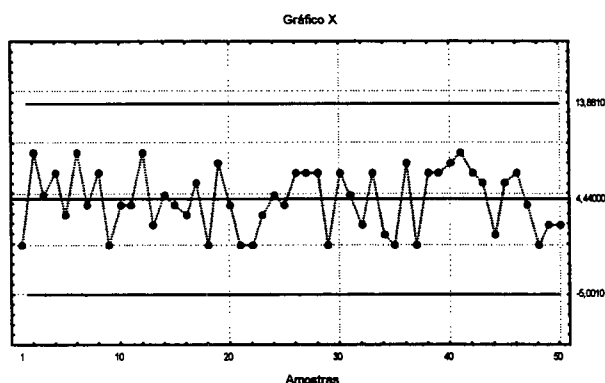


Figura 2.16: Gráfico de controle mostrando falta de variabilidade

- variabilidade excessiva: caracterizado por presença de pontos altos e baixos, sendo também chamados de flutuação errática. São fatores relacionados ao tipo de processo.

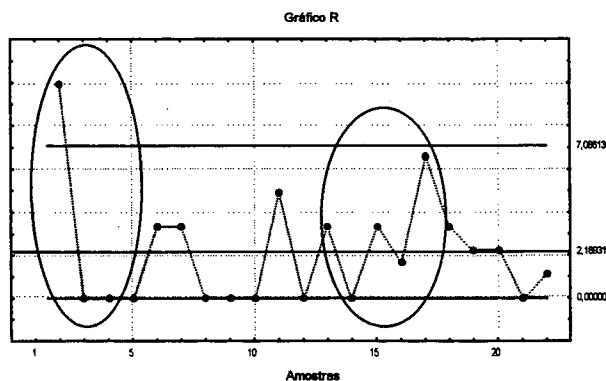


Figura 2.17: Gráfico de controle mostrando variabilidade excessiva

Segundo Doty (1990), as seis principais categorias de causas que tornam o processo fora de controle são as seguintes:

1. material;
2. erros de operação;
3. erros do processo;
4. erros de uso de ferramentas;
5. erros de medição;
6. erros de procedimentos ou métodos.

Outra forma de analisar o processo é calcular a Capabilidade do Processo, isto é, conhecer a consistência do processo.

Os quatro tipos de índices para medir a capabilidade do processo e suas respectivas fórmulas são as seguintes:

$$C_p = (LSE - LIE) / 6\sigma$$

$$C_{pl} = (\bar{\bar{X}} - LSE) / 3\sigma$$

$$C_{pu} = (LIE - \bar{\bar{X}}) / 3\sigma$$

$$C_{pk} = C_p \left\{ 1 - \left[\left(2 \left| m - \bar{\bar{X}} \right| \right) / (LSC - LIC) \right] \right\}$$

onde: C_p	=	coeficiente básico de capabilidade
C_{pl}	=	coeficiente inferior de capabilidade
C_{pu}	=	coeficiente superior de capabilidade
C_{pk}	=	o menor coeficiente entre C_{pl} e C_{pu}
LSE	=	limite superior de especificação;
LIE	=	limite inferior de especificação
LSC	=	limite superior de controle;
LIC	=	limite inferior de controle;
$\bar{\bar{X}}$	=	média do processo;
m	=	média da especificação;
σ	=	desvio padrão do processo;

O índice C_p se preocupa com a centralização do processo, isto é, com a média estimada do processo $\bar{\bar{X}}$ em relação aos limites de especificação. Se $C_p \geq 1$, o processo é dito capaz e, se $C_p < 1$, o processo é dito não capaz.

O índice C_{pk} mede quantos 3 desvios padrões estão situados em relação ao intervalo entre a média do processo e um dos limites especificados. Quanto maior o C_{pk} maior a dispersão do processo ou maior o afastamento da média do processo em relação ao alvo. Segundo a ASQC, o valor mínimo para o C_{pk} é de 1,33.

2.3.5 Outros Gráficos do CEP

Os seguintes tipos de gráficos de controle também podem ser usados para controlar efetivamente as diferentes situações de medição :

- gráfico X e MR (média e amplitude móvel)
- gráfico μ e σ (média e desvio padrão)
- gráfico p-c (pré-controle)
- gráficos que utilizam codificação de base zero.
- gráficos que utilizam limites de controle constantes

A seguir serão apresentados os gráficos que, segundo o método Deming de administração, também são úteis para a qualidade.

1. Diagramas de dispersão

Os diagramas de dispersão servem para representar graficamente a relação entre duas variáveis correspondentes. Neste diagrama, duas variáveis são plotadas usando-se coordenadas x e y, com os pontos mostrando se existe ou não correlação entre estas duas variáveis.

2. Diagrama de linha (gráfico corrido)

Os diagramas de linha servem para representar graficamente dados durante um determinado tempo, conseguindo, assim, identificar se existe ou não tendências. Este tipo de diagrama é um dos instrumentos estatísticos mais simples, pois na realidade representa uma série estatística, mais conhecida como Série Temporal.

3. Histogramas

Os histogramas são um recurso gráfico composto por diagramas de colunas ou barras os quais mostram com que frequência os dados caem dentro de intervalos de valores especificados. É possível obter informações úteis sobre o estado da população através da análise do tipo do perfil do histograma.

4. Fluxograma

Um fluxograma é uma fotografia do processo. É muito importante para que todos compreendam como o processo está ocorrendo. As vantagens de se utilizar o fluxograma num processo é que ele pode revelar duplicidade, desentendimentos ou, até mesmo, ineficiência.

5. Gráficos de pareto

Segundo Kume (1988), a história do surgimento do Gráfico de Pareto tem origem em 1897, quando o economista italiano V. Pareto apresentou uma fórmula que mostrava a desigualdade da distribuição de salários. Em 1907, o economista americano M. C. Lorenz apresentou teoria semelhante, agora em forma de diagrama. Foi, porém, o Dr. J. M. Juran quem aplicou esses conceitos em Controle de Qualidade, aplicando o método do diagrama de Lorenz, denominando este método de Análise de Pareto.

Os Gráficos ou Diagramas de Pareto podem ser utilizados como guias para o estabelecimento de prioridades ou para mostrar áreas onde maiores esforços devem ser feitos. A frase "os poucos vitais e os muito triviais" é usualmente chamada como o Princípio de Pareto.

Os gráficos de Pareto podem ser divididos entre aqueles que são utilizados para descobrir o problema maior, ou seja, os Sintomas, ou aqueles que são utilizados para descobrir a causa maior, denominados por Causas.

A Análise de Pareto consta de três etapas principais:

- estratificação;
- levantamento de dados;
- diagrama de pareto propriamente dito.

Essa sequência de operações pode ser repetida várias vezes, sempre tomando os itens prioritários como novos problemas, até serem localizados e quantificados os vários projetos de solução dos problemas.

A figura 2.18, a seguir, mostra um exemplo de Gráfico de Pareto.

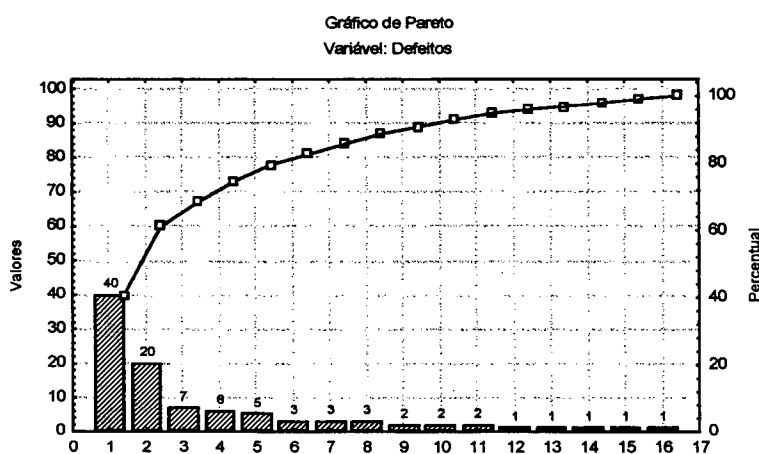


Figura 2.18: Gráfico de Pareto

6. Diagramas de causa e efeito

Segundo Kume (1988), foi K. Ishikawa, Professor da Universidade de Tóquio, que em 1953, pela primeira vez utilizou este método, ao sintetizar as opiniões dos engenheiros de uma fábrica na forma de um diagrama de causa e efeito, quando estes discutiam um problema relativo a qualidade. Segundo o mesmo autor, os próprios

auxiliares do Prof. Ishikawa já utilizavam este método para por em ordem os fatores nas suas atividades de pesquisa.

A sua aplicabilidade foi logo difundida e amplamente utilizada em empresas de todo o Japão, sendo incluído na terminologia de controle de qualidade das Normas Industriais Japonesas, mais conhecidas como JIS ("Japanese Industrial Standards"). Segundo estas normas, o Diagrama de Causa e Efeito, pode ser definido como um diagrama que mostra a relação entre uma característica da qualidade e os fatores.

Também chamado de Espinha de Peixe, pelas suas características construtivas, o diagrama tem sido aplicado no mundo inteiro, não somente por tratar das características da qualidade dos produtos, mas também para outros campos.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo realizou-se uma revisão teórica do Controle Estatístico do Processo e como utilizá-lo como ferramenta de análise.

Inicialmente foi apresentado um breve histórico da qualidade, procurando mostrar a questão da evolução do conceito de qualidades através dos tempos.

A seguir foi apresentada a teoria básica do CEP e uma revisão dos conceitos de estatística relacionados com o CEP, como: universo e amostra, parâmetros e estatística, medidas de tendência central, medidas de dispersão e curva normal.

Posteriormente foram apresentados os principais gráficos de controle utilizados no CEP, assim como suas características, como construir, utilizar e analisar.

No capítulo que segue, serão apresentadas as ferramentas de análise de comportamento hidráulico de uma turbina e uma proposta de metodologia que visa construir um índice de desempenho, que possa ser acompanhado através de gráficos de controle.

Capítulo 3: FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UMA TURBINA TIPO FRANCIS E METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Caracterização da Turbina em uma Central Hidrelétrica

As turbinas hidráulicas convertem a energia potencial da água em energia cinética, pela utilização de diferenças entre dois níveis de água, os quais são chamados de altura (H). Essa diferença entre dois níveis de água é usualmente obtida com a construção de uma estrutura especial, chamada de Barragem, cuja altura dependerá das condições do local.

Pode-se definir o tipo de instalação hidrelétrica adequada após analisar-se todos os fatores que podem influir na construção de uma barragem, tais como: dados topográficos, hidrológicos, pluviométricos, fluviométricos e geológicos do local; além dos fatores econômicos e sociais. Segundo Zulcy de Souza (1983), existem vários critérios para se classificar as centrais hidrelétricas:

- quanto a sua potência (N) em kW:

- microcentrais	$N < 100$
- minicentrais	$100 \leq N < 1.000$
- pequenas centrais	$1.000 \leq N < 10.000$
- médias centrais	$10.000 \leq N < 100.000$
- grandes centrais	$N \geq 100.000$

- quanto a sua queda (H) em m:

- centrais de baixíssima queda	$H < 10$
- centrais de baixa queda	$10 \leq H < 50$
- centrais de média queda	$50 \leq H < 250$
- centrais de alta queda	$H \geq 250$

- quanto à forma de captação de água
 - centrais em desvios e em derivação
 - centrais em leito de rio ou de represamento
- quanto à forma de utilizar as vazões naturais
 - centrais a fio d'água
 - centrais com regularização: diária, semanal e plurianual
- quanto a sua função no sistema
 - centrais de base
 - centrais flutuantes
 - centrais de ponta

A grande variedade de combinações de alturas e descargas em instalações hidrelétricas, possibilita um grande número e uma considerável variação das dimensões das turbinas. As turbinas, então, podem ser divididas em duas classes:

- turbinas de reação: Segundo a TB-74 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, turbinas de reação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). Essas turbinas são as mais usuais e cobrem uma faixa maior de alturas para as instalações hidrelétricas (1,5 a 300 m). Elas podem ser subdivididas em: pás ajustáveis (Kaplan) e pás fixas ou axial radial (Francis). Nas turbinas de reação a caixa espiral tem a função de guiar a água totalmente e uniformemente por toda a circunferência através do distribuidor. O distribuidor tem o objetivo de dirigir a vazão de água diretamente para a roda e, regular a descarga através da turbina. O tubo de sucção, nos mais diferentes tipos, reduz a

velocidade da água na saída da turbina. Cada turbina pode ser dividida, também, dependendo da sua velocidade específica, podendo ser, de baixa, média ou de alta velocidade.

- turbinas de ação: Segundo a TB-74 da ABNT, turbinas de ação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). Essas turbinas são operadas sobre pressão atmosférica por um jato livre. A altura encontrada é convertida em velocidade de queda ($v = K_v \sqrt{2gH}$), com K_v variando entre 0,97 e 0,985. Elas podem ser subdivididas em: conchas fixas (Pelton), jatos inclinados ou jatos duplos. Nas turbinas de ação a água não passa por toda a circunferência da roda, mas através dos jatos.

A tabela 3.1 a seguir, mostra uma classificação das turbinas hidráulicas em função da classe à que pertence.

CLASSES	REAÇÃO			AÇÃO		
Sistemas	Axial		Francis (Axial- Radial)	Pelton	Jato Inclinado	Jato Duplo
	Kaplan (pás ajustáveis)	pás fixas				
Limites De Aplicação	H = 2-70 m D ₁ = 1,0 a 10,0 m N > 250.000 kW	H = 2-70 m D ₁ = 0,35 a 9,0 m N > 150.000 kW	H = 30- 450 m (grandes) H = 2- 200 m (pequenas) D ₁ = 0,35 a 7,5 m N > 500.000 kW	H = 300- 1700 m (grandes) H = 40- 250 m (pequenas) D ₁ = 0,36 a 5,2 m N > 110.000 kW	H=30- 400 m N= 10- 4000 kW	H=10- 60 m N=10- 150 kW

Tabela 3.1: Classificação das Turbinas Hidráulicas

Já a tabela 3.2 a seguir, mostra uma classificação das turbinas Kaplan, Francis e Pelton em função de sua velocidade específica.

Tipos de Turbinas	Velocidade Específica		
	Baixa	Média	Alta
KAPLAN	300 – 450	500 - 700	800 - 1100
FRANCIS	60 – 150	150 - 250	250 - 400
PELTON	4 – 10	14 - 25	30 - 60

Tabela 3.2: Classificação das Turbinas Kaplan, Francis e Pelton em função da velocidade específica

Segundo Macintyre (1983), as principais grandezas que caracterizam o funcionamento de uma turbina hidráulica são as seguintes:

- queda disponível H , em m;
- a descarga Q , expressa em m^3/s ;
- a “velocidade específica” n , expressa em rpm;
- o momento resistente útil M , em kgf.m;
- a potência útil N , em cv, kW ou MW;
- o rendimento total η ;
- a abertura “a” em (mm) do aparelho de admissão de água, chamado distribuidor, a qual influi diretamente sobre a descarga.

A seguir será apresentada a nomenclatura e simbologia, recomendadas pela ABNT, das principais grandezas características de uma turbina hidráulica, ou seja, altura, vazão, potência e rendimento:

- altura potencial Z ;
- cota do ponto h ;

▪ altura piezométrica ¹	h_p ;
▪ altura representativa da carga estática	p/γ ;
▪ altura dinâmica	h_v ;
▪ altura representativa da velocidade	$v^2/2g$;
▪ altura de queda bruta	H_g ;
▪ altura total	h_t , onde: $h_t = Z + h_p + h_v$ ou $h_t = h + p/\gamma + v^2/2g$;
▪ altura de queda útil	H ;
▪ altura de queda nominal	H_n ;
▪ vazão	Q ;
▪ potência hidráulica	P_d , onde: $P_d = (\gamma \cdot Q \cdot H_n)/102$ em MW;
▪ potência útil ou nominal	$P_t = N$, onde: $P_t = (\gamma \cdot \eta_t \cdot Q \cdot H)/102$ em MW;
▪ potência garantida	P_n ;
▪ potência motriz	P_m ;
▪ rendimento mecânico	ρ , onde: $\rho = P_t / P_m$;
▪ rendimento hidráulico	ε , onde: $\varepsilon = P_m / P_d$;
▪ rendimento da turbina	η_t , onde: $\eta_t = P_t / P_d$;

3.2 Caracterização do Problema

Neste trabalho será dada ênfase especial a turbinas do tipo Francis instaladas na ITAIPU BINACIONAL. Esta escolha se deve ao fato do envolvimento direto do autor e da facilidade de obtenção dos dados necessários à pesquisa.

Cada turbina é projetada para atender certos valores prefixados de descarga (Q), de altura de queda (H) e de número de rotações por minuto (n), obtendo um rendimento total (η), máximo. Como a operação da turbina pode ser variável em função dos valores de Q e H , é importante conhecer o que acontece com as grandezas envolvidas.

¹ Altura piezométrica: representa a altura de uma coluna líquida de peso específico γ , suposta em repouso, e que exerce sobre sua base uma pressão unitária p , não estando sua extremidade superior submetida a pressão alguma.

Devido à dificuldade de se estabelecer uma equação matemática simples que traduza a dependência entre as variáveis envolvidas, é necessário realizar ensaios de laboratório ou de campo e estudos da similaridade geométrica e hidrodinâmica, para que seja possível estabelecer como se comporta uma turbina, quando variam essas grandezas.

As principais relações que se podem estabelecer destes ensaios são as seguintes:

- variação de Q , n e N com a queda, para uma mesma turbina;
- variação do rendimento em função do n , Q e N , para uma mesma turbina;
- variação de turbinas geometricamente semelhantes com a mesma queda;
- variação de turbinas geometricamente semelhantes sob quedas diferentes (modelo reduzido).

Os ensaios, tanto em laboratório, como no campo, são ferramentas de análise muito importantes, pois ajudam a verificar o comportamento das turbinas sob certas condições operativas, servem como campo de pesquisa, para aperfeiçoamentos e inovações no projeto da turbina, possibilitam a obtenção de dados para traçados de curvas características e, ainda, verificar a similaridade entre protótipo e modelo.

Os ensaios em laboratórios podem ser em instituições de pequeno ou grande porte, de universidades ou fabricantes. São utilizados equipamentos especiais para se determinar as medições de nível, vazão, pressão, número de rotações e abertura do distribuidor, possibilitando a determinação dos valores de potência e rendimento e, conseqüentemente, o traçado do gráfico de colina, ou seja, curvas de isorendimento em função da rotação unitária e vazão unitária, ou em função da abertura do distribuidor.

O gráfico de colina, conforme mostrado na figura 3.1, apresenta as curvas de vazão unitária - Q_{11} - (eixo y) , em função da rotação unitária - n_{11} - (eixo x). São mostrados, também, os valores de rendimento - η , em função da rotação unitária, com abertura constante do distribuidor, sendo chamadas de curvas de isorendimento.

Este tipo de gráfico é muito importante, pois determina o campo básico de funcionamento da turbina e é muito útil, quando da transposição dos resultados para o protótipo, que será mostrado a seguir.

A transposição do modelo para o protótipo, considerando os efeitos de escala, deve seguir os passos indicados pela IEC - International Electrotechnical Commission, publicação IEC 995. Esta norma, porém, faculta a utilização dos prescritos da norma anterior, a IEC 193, caso o ensaio em modelo reduzido da turbina em estudo, tenha sido realizado seguindo estes padrões.

A seguir serão mostrados os passos necessários para a transposição do modelo para o protótipo, segundo a IEC 193, utilizados nas turbinas da ITAIPU, bem como, uma nova metodologia de determinação dos valores de eficiência e vazão nos seus pontos de BEP - "Best Efficiency Point", sem a necessidade de utilização dos gráficos de colina.

I. Calcular n_{11p} (rotação unitária) para as condições de referência do protótipo:

$$n_{11p} = n * D / H_n^{1/2}$$

onde : n = rotação unitária do protótipo (rpm);

D = diâmetro de saída da turbina (m)

H_n = Altura líquida de referência (m)

II. Calcular Δ_n (Variação do rendimento)

$$\Delta_n = 0,75(1 - \eta_{m(BEP)}) \left[1 - \left(R_{e_{mod}} / R_{e_{prot}} \right)^{0,2} \right], \text{ onde:}$$

$$- R_{e_{mod}} = D_m / \nu_m * (2.g.H_m)^{1/2}, \text{ sendo:}$$

$R_{e_{mod}}$ = número de Reynolds do modelo;

D_m = diâmetro de saída da turbina no modelo;

H_m = altura de queda durante ensaio do modelo;

g = aceleração da gravidade no local do ensaio do modelo;

ν_m = viscosidade cinemática da água na temperatura do ensaio.

$$- \quad R_{e_{prot}} = D_p / \nu_p * (2.g.H_p)^{1/2}, \text{ sendo:}$$

$R_{e_{prot}}$ = número de Reynolds do protótipo;

D_p = diâmetro de saída da turbina no protótipo;

H_p = altura de queda durante ensaio do protótipo;

g = aceleração da gravidade no local do ensaio do protótipo;

ν_p = viscosidade cinemática da água na temperatura do ensaio.

$$- \quad \eta_{m(BEP)} = \text{Rendimento do modelo no ponto BEP – “Best Efficiency Point” ;}$$

Normalmente, com o valor da rotação unitária n_{11p} , entra-se no gráfico de colina e determina-se o valor do rendimento do modelo no ponto de BEP. Um grande problema que se apresenta neste momento é a questão da subjetividade na determinação do valor do rendimento, devido a possibilidade de interpretações dúbias causada por distorções das cópias ou por dificuldade de interpolações, etc. .

Pensando nisto e visando automatizar o processo, procurou-se determinar uma forma onde não seria mais necessária a utilização do gráfico de colina. Essa alternativa seria a de encontrar equações matemáticas que possibilitassem identificar o comportamento das variáveis envolvidas no processo.

As equações polinomiais de quarto grau foram as que melhor expressaram o comportamento das variáveis envolvidas, rendimento e rotação unitária, em função da abertura, visto que esta variável é um dado de entrada constante.

Assim para cada patamar de abertura, foi ajustada uma equação polinomial de quarto grau, do tipo $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$, das seguintes variáveis:

- variável $x = n_{11}$ (rotação unitária)
- variável $y = \eta$ (rendimento)

Deste modo, para cada valor de abertura tem-se um correspondente valor de eficiência. Estes valores definem uma curva de eficiência tendo em vista um valor de n_{11p} dado. Esta curva é ajustada, através do método dos mínimos quadrados, utilizando-se o pacote estatístico “STATISTICA®”, e com isso obtém-se o ponto de máximo (vértice), que corresponde ao BEP.

Com isto elimina-se a necessidade de se utilizar o gráfico de colina, toda vez que se precisa calcular o rendimento no BEP, aumentando o grau de confiança e a sua repetibilidade.

III. calcular o valor de n_{11m} , com o valor de Δ_n calculado:

$$n_{11m} = n_{11p} (1 + \Delta_n)^{-1/2}$$

IV. calcular o rendimento $\eta_{m(BEP)}$ no BEP do modelo reduzido:

$$\eta_{m(BEP)} = \text{com a rotação unitária } n_{11m}$$

Utilizando o mesmo procedimento do passo II, porém, com a rotação unitária n_{11m} , calcula-se o valor do rendimento do modelo $\eta_{m(BEP)}$.

V. calcular a vazão unitária Q_{11m} no BEP do modelo reduzido:

$$Q_{11m} = \text{com a rotação } n_{11m}$$

Agora, para cada patamar de abertura, ajusta-se uma equação polinomial de quarto grau, do tipo $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$, das seguintes variáveis:

- variável $x = n_{11}$ (rotação unitária)
- variável $y = Q_{11}$ (vazão unitária)

Deste modo, para cada valor de abertura tem-se um correspondente valor de vazão unitária. Estes valores definem uma equação do tipo $y = ax + b$, tendo em vista um valor de n_{11m} dado. Esta equação é ajustada, através do método dos mínimos quadrados, utilizando-se o pacote estatístico “STATISTICA®”, e com isso obtém-se o valor da vazão unitária do modelo $Q_{11m(BEP)}$. A seguir, calcula-se o valor da vazão unitária do protótipo Q_{11p} , com a equação mostrada a seguir:

$$Q_{11p} = Q_{11m} \cdot D^2 \cdot H_n^{1/2}$$

VI. transpor do modelo para o protótipo, calculando Q_p e η_p , obtendo o valor da Potência Esperada (P_e)

- $\eta_p = \eta_{m(BEP)} + \Delta_n$
- $Q_p = Q_{11p} \cdot D^2 \cdot H_n^{1/2}$
- $P_e = (Q_p \cdot H_n / 102) \eta_p$

VII. arquivar os dados

Nota-se que através deste procedimento é possível determinar o valor de Potência esperada (P_e) do protótipo, a partir dos dados de queda bruta (H_g) e abertura do distribuidor (a), levando em consideração os efeitos de escala, sem a necessidade de utilização sistemática do gráfico de colina, aumentando o grau de confiança e sua repetibilidade.

Nos ensaios de campo são feitas medições de eficiência, potência hidráulica, descarga, energia específica hidráulica da máquina, potência elétrica e velocidade rotacional. Com relação a medição da descarga, existe a possibilidade de se utilizar métodos absolutos ou relativos.

A escolha do método de medição da descarga pode influir na precisão das medições, além de ditar a condução e duração do teste no campo. Alguns fatores que podem afetar esta escolha são:

- limitações impostas pelo projetista da Planta;
- custo da instalação de equipamentos especiais;
- limitações impostas pelas condições de operação da Planta.

A seguir, apresentam-se uma relação dos métodos absolutos de medição, que dão maior precisão nos resultados:

- método da velocidade-área por meio de medidores de corrente ou tubos de Pitot;
- método de pressão-tempo (método de Gibson);
- método dos traços, podendo ser pelo “time-transient” ou medição da diluição;
- método padrão “thin-plate weirs”;
- método de pressão diferencial;
- método de medição volumétrica.

Os métodos relativos, tal como o método de Winter Kennedy, obtêm um valor relativo da descarga e, são chamados de Ensaio de Índice ou “Index Tests”, sendo considerados como métodos secundários, devido a sua menor precisão. Eles são utilizados normalmente durante o comissionamento e operação da máquina.

Os ensaios de eficiência relativa (Index Tests) podem ser úteis para os seguintes objetivos:

- determinar as características de performance expressados pelos valores relativos de potência, descarga e eficiência;
- verificar a garantia de potência, se ambas as partes concordarem;
- estender informações de performance fora da faixa de garantia, se os meios de medição de descarga forem calibrados;
- acessar mudanças na eficiência e/ou potência, devido a alterações nos resultados causados pela cavitação² interna, mudança nos valores de energia potencial específica de sucção e/ou energia específica hidráulica da máquina;

² Cavitação: fenômeno físico provocado pela formação de bolhas de vapor d’água, acompanhado por desgastes nas pás das turbinas, ocasionando corrosão, perdas de eficiência, vibração e ruído excessivo.

- acessar mudanças na eficiência e/ou potência da máquina resultante do uso, reparo ou modificação;
- obter dados para os instrumentos de medição de descargas permanentes, assumindo como valor absoluto da eficiência da turbina, em algum ponto de operação, ou por calibração com os resultados dos ensaios de campo;
- otimizar a operação da central hidrelétrica que tenha muitas unidades;
- comparar as curvas de índice, com as curvas esperadas do protótipo, tendo como base os resultados dos testes do modelo reduzido.

As publicações preparadas pelos comitês técnicos da IEC são as principais referências em relação as normas internacionais que norteiam os ensaios em turbinas. As normas brasileiras também são baseadas nestas publicações.

É significativa a importância dos ensaios que são realizados em turbinas hidráulicas, tanto em laboratórios, como no campo.

Os resultados dos testes em modelo podem demonstrar que certos parâmetros, tais como: eficiência, potência garantida, vazão, altura, cavitação, etc. , podem ser atingidos, quando transpostos para o protótipo.

Já os resultados dos testes em campo, realizados principalmente na fase de comissionamento, com fornecimento de equipamentos previstos em contrato, podem confirmar se os resultados dos testes em modelo ou os valores contratuais foram atendidos.

Os ensaios de campo realizados fora do período de comissionamento, ou seja, aqueles que não envolvem garantia contratual e necessitam de equipamentos especiais, envolvendo custos adicionais, também são importantes, pois ajudam na determinação da performance da turbina, podendo detectar, ou não, perdas de eficiência do equipamento.

Vários trabalhos, como os de J.E. Giles e outros do "Tennessee Valley Authority - TVA, de R. Keith Jones e outros, também do TVA, de James Cook e outros do "IIT Research Institute", de Scott R. Hamilton P.E. da "Washington Water Power Company", de Francisco Muccillo Júnior da CESP - Companhia Energética de São

Paulo, de J. N. Stenzel da COPEL - Companhia de Eletricidade do Paraná, de Fernando Bastos Filho e outros da ITAIPU BINACIONAL e dos relatórios de ensaios realizados nas turbinas de ITAIPU, todos relativos a ensaios de eficiência relativa, apresentam resultados significativos com relação ao controle da eficiência das turbinas. Dentre as principais observações encontradas nestes trabalhos pode-se enumerar as seguintes:

1. possibilidade de detecção e diagnóstico precoce de desgaste devido ao fenômeno da cavitação;
2. a possibilidade de monitorar a performance representa uma significativa oportunidade de aumentar a eficiência das turbinas hidráulicas e reduzir custos de manutenção;
3. possibilidade de desenvolver e implementar sistema on-line para monitorar eficiência e cavitação da central hidrelétrica;
4. possibilidade de otimização de energia, economizando água e energia;
5. possibilidade de identificação de problemas de operação, tal como, bloqueio nas grades;
6. possibilidade de criação de banco de dados com os resultados dos ensaios realizados ao longo do tempo;
7. possibilidade de complementação dos dados obtidos nos testes de comissionamento.

Apesar das inúmeras possibilidades, a execução dos ensaios de eficiência relativa, apresenta as seguintes dificuldades, que impedem a maioria das usinas de utilizar este método para monitorar a performance de suas turbinas:

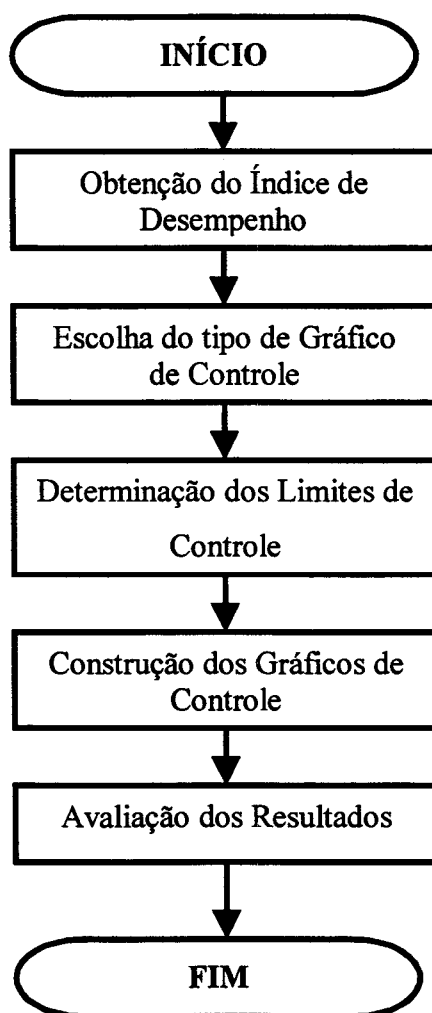
- necessidade de uma programação antecipada, em função da demanda contratada pela Usina, visto que é necessária a disponibilização de cada máquina no período correspondente ao ensaio;
- necessidade de repetição dos ensaios a fim de possibilitar a ampliação e consolidação do banco de dados e, conseqüentemente, obter a "impressão digital" de cada turbina, bem como para acompanhar seu desempenho ao longo do tempo.

A questão que se apresenta então é a viabilização de criação de um índice que seja independente da realização de um ensaio específico, que aproveite os resultados dos testes em modelo reduzido, e as medidas obtidas dos dados de produção.

Este índice de desempenho poderia ser encontrado dividindo-se o valor da Potência medida nos terminais da usina, pelo valor da Potência Esperada, obtida pela transposição do modelo reduzido para o protótipo, sendo o seu acompanhamento realizado por um gráfico de controle, conforme metodologia proposta a seguir. Vale lembrar que esta metodologia é indicada para turbinas tipo Francis.

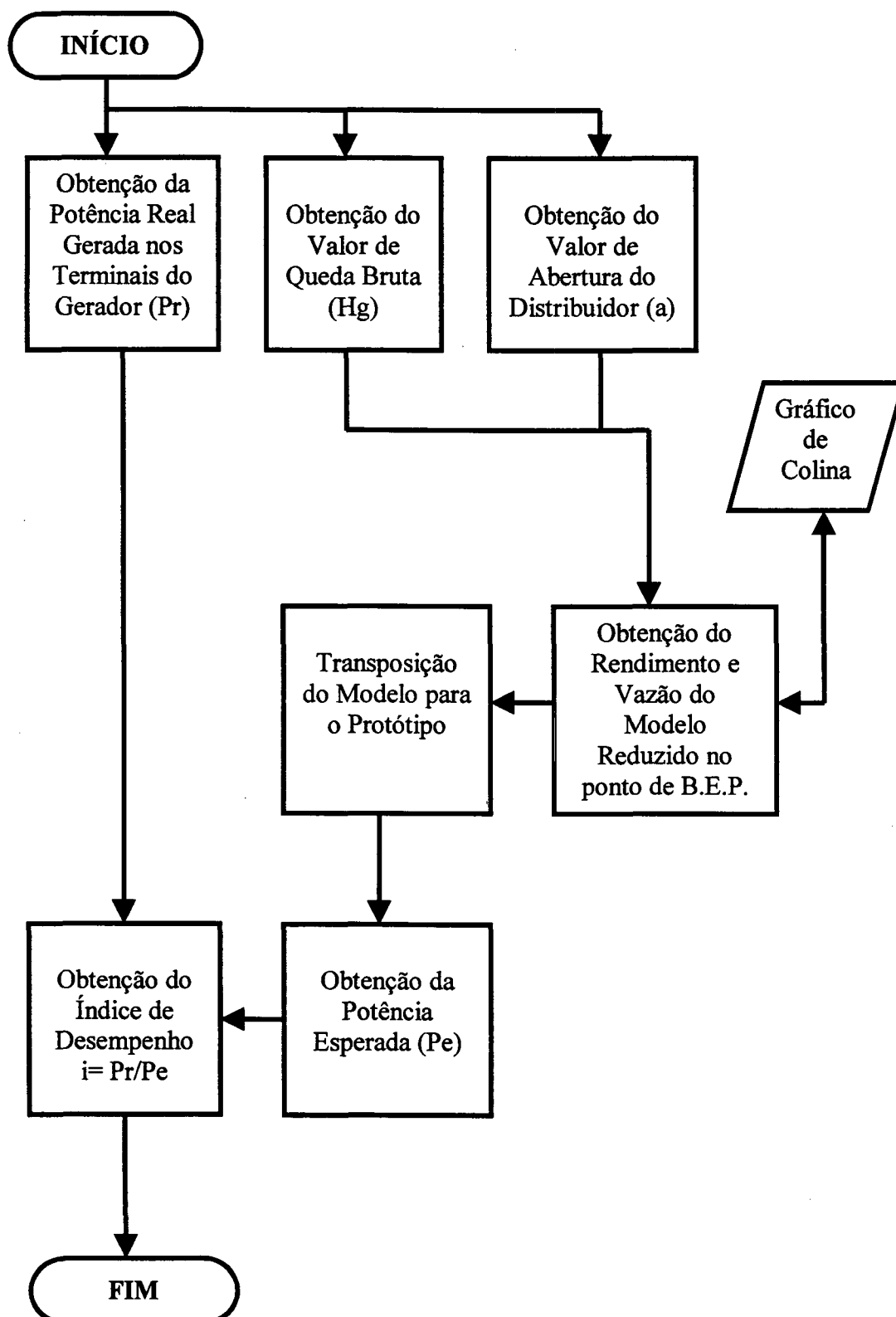
3.3 Metodologia Proposta

O Fluxograma a seguir apresenta os passos necessários para a implementação da metodologia proposta:



3.3.1 Obtenção do Índice de Desempenho

O Fluxograma a seguir apresenta os passos necessários para a obtenção do Índice de Desempenho:



Normalmente pode se verificar o desempenho de uma turbina hidráulica através do cálculo de sua eficiência. O que dificulta sobremaneira o cálculo da eficiência de uma turbina é a necessidade de se conhecer parâmetros que dependem de medições específicas e/ou ensaios especiais, tais como, vazão, perdas de carga, etc. .

O desenvolvimento de uma nova metodologia de se verificar o desempenho de uma turbina hidráulica, parte da premissa principal de se poder contar com um valor totalmente independente de valores que necessitem de ensaios especiais, ou seja, um índice que represente a realidade, independente da situação a que esteja submetida a turbina.

O índice de desempenho proposto pode ser calculado dividindo-se o valor da Potência Real gerada, pelo valor da Potência Esperada da turbina em estudo, com a transposição do protótipo para o modelo, efetuada pelo procedimento descrito no item 3.2.

A escolha da utilização de um índice de desempenho é justificada, principalmente, pela relação entre os valores obtidos de Potência Real e Potência Esperada, ou seja, o valor do denominador da fração, (P_e), é bastante preciso, pois é calculado a partir de dados de projeto, se comparado com o valor do numerador, (P_r), que está sujeito às condições operativas da Usina.

Outro fator importante é a questão da independência do índice, pois o mesmo já estaria englobando todos os fatores, tanto operacionais, quanto de projeto, nos seus resultados, possibilitando um controle rápido, versátil e seguro.

A viabilização da construção deste índice depende somente do conhecimento de três variáveis:

- queda bruta (H_g);
- valor da abertura do distribuidor (a);
- potência real gerada (P_r).

O conhecimento do valor destas variáveis não depende da realização de nenhum ensaio especial, porém, a coleta de dados deve ser simultânea, a fim de que haja correspondência entre os valores medidos.

Este índice, teoricamente, deveria ser 1,0 (um), caso o modelo e o protótipo fossem exatamente iguais e a turbina estivesse trabalhando no seu ponto de eficiência máxima. Como, porém, existem várias condições e situações diferentes de operação, este índice pode variar muito, inclusive ser maior do que 1,0 (um).

São estas situações que se deseja conhecer, inclusive para poder identificar as várias condições de operação de uma turbina. Será possível identificar por exemplo:

- comportamento da turbina ao longo do tempo;
- faixa de operação da turbina ao longo do tempo e
- necessidade de manutenção ou não.

Um outro fator importante é a escolha adequada do gráfico de controle, o que será descrito no item a seguir.

3.3.2 Escolha do tipo de Gráfico de Controle

Segundo Doty (1990), a escolha do tipo de gráfico de controle a se usar (variável ou atributo) dependerá da natureza das medições e dos custos envolvidos.

Neste caso deve-se escolher que tipo de gráfico de controle por variável utilizar.

Conforme mostrado no capítulo 2, os gráficos de controle por variável mais utilizados são:

- gráfico tipo (X, R);
- gráfico tipo (X, s);
- gráfico tipo (MA, MR)

Ainda segundo Doty (1990), deve ser escolhido os gráficos dos tipos (X,R) ou (X,s), quando:

- se instala um novo processo ou produto ou ainda quando se quer mudar um processo ou um produto antigo;
- o processo tem problemas e não pode produzir conforme as tolerâncias;
- grande tamanhos de subamostras são desejadas, maior que 8, por exemplo;
- a característica crítica é mensurável.

Já para os gráficos do tipo (MA,MR), Doty (1990) indica utilizá-los quando:

- é difícil obter mais de uma medida por amostra;
- a maioria ou todos os erros são desejáveis de ser medidos ou testados;
- inspeções e testes automáticos são utilizados;
- tempos de processos são longos, ou os dados são obtidos muito lentamente;

De acordo com estas características, o gráfico de controle por variável mais adequado para este trabalho é o do tipo MA, pois a característica de tendência é melhor representada por este tipo de gráfico, sendo, por isso, mais representativo e compreensível.

3.3.3 Determinação dos Limites de Controle

Os limites de controle são os que representam mais ou menos 3σ (três desvios padrões) do valor médio medido.

3.3.4 Construção dos Gráficos de Controle

A construção dos Gráficos de Controle depende do tamanho da amostra e da coleta dos dados.

O tamanho da amostra vai depender da disponibilização dos dados, porém, deve se iniciar com uma amostra de pelo menos 100 observações, a fim de que os resultados sejam o mais estatisticamente realistas.

A coleta de dados deve ser simultânea para representar as características da população.

No período de tempo compreendido pela coleta de dados, a medição deve ser aleatória para que todas as características de operação sejam cobertas.

Os dados devem ser tabulados e gravados em arquivos a fim de que possam ser utilizados quando necessário.

3.3.5 Avaliação dos Resultados

Os resultados devem ser avaliados de acordo com as condições de operação característica de cada turbina. Esses fatores podem variar muito, porém, o seu conhecimento é de fundamental importância na avaliação dos resultados. Deve-se utilizar, também, um software estatístico adequado, conforme disponibilidade.

A metodologia proposta para obter o índice de desempenho através de gráfico de controle, evidencia a importância e a necessidade do conhecimento do processo e dos dados que estão sendo coletados. Sem esse conhecimento, a construção e análise do gráfico de controle fica impraticável.

No capítulo seguinte será apresentada uma aplicação prática da metodologia proposta nas turbinas hidráulicas da ITAIPU BINACIONAL.

Capítulo 4: APLICAÇÃO PRÁTICA

Este capítulo apresenta primeiramente a entidade ITAIPU BINACIONAL, onde pretende-se aplicar a metodologia proposta para a criação de um índice de desempenho para acompanhamento da performance de suas turbinas.

Em seguida será apresentada a aplicação prática da metodologia proposta no capítulo anterior.

4.1 A Entidade Itaipu Binacional

4.1.1 Histórico

A entidade binacional ITAIPU, foi criada por um Tratado assinado pelo Brasil e o Paraguai, em 26 de abril de 1973. Este Tratado previa o Aproveitamento Hidrelétrico dos Recursos Hídricos do Rio Paraná, pertencentes em condomínio aos dois países, desde e inclusive o Salto Grande de Sete Quedas ou Salto de Guaíra até a Foz do Rio Iguaçu.

A ITAIPU BINACIONAL, surgiu efetivamente em maio de 1974, para gerenciar a construção da Usina, sendo que o início efetivo das obras se deu em janeiro de 1975. Seus participantes igualitários no capital, são as Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS, sociedade anônima de economia mista brasileira e a Administración Nacional de Eletricidad – ANDE, entidade autárquica paraguaia.

Dentre outras disposições, o Tratado de ITAIPU estabelece que a energia produzida pelo aproveitamento será dividida igualmente entre ambos os países, possuindo cada um o direito de adquirir a energia que não for utilizada pelo outro para seu próprio consumo.

Um grande marco na construção de ITAIPU, em 14 de outubro de 1978, foi a abertura do canal de desvio do Rio Paraná, que permitiu secar o leito original para a construção no local da barragem principal, em concreto.

Outro marco importante, na área diplomática foi a assinatura do acordo tripartite pelo Brasil, Paraguai e Argentina, em 19 de outubro de 1979, para aproveitamento dos recursos hidráulicos a jusante, no trecho do Rio Paraná desde as Sete Quedas até a foz do Rio da Prata. Este acordo estabeleceu os níveis do rio e as variações permitidas para os diferentes empreendimentos hidrelétricos na bacia comum aos três países.

Com a conclusão das obras da barragem, as comportas do canal de desvio foram fechadas, em 13 de outubro de 1982, dando início a formação do Reservatório de ITAIPU. O reservatório, um dos menores do país, com área de apenas 1350 km², foi formado em apenas 14 dias, tendo as águas subido 100 metros e chegado às comportas do vertedouro as 10 horas do dia 27 de outubro.

Durante o período de formação do Lago de ITAIPU, equipes da área ambiental da ITAIPU BINACIONAL percorreram em barcos e lanchas toda a área do reservatório, salvando centenas de espécies de animais da região, na operação conhecida como Mymba Kuera.

A entrada das unidades geradoras em operação comercial aconteceu a partir de 5 de maio de 1984. As unidades geradoras foram sendo instaladas, de acordo com o cronograma, ao ritmo de duas a três por ano, até que a décima oitava e última unidade geradora entrou em fase de produção comercial de energia, no dia 9 de abril de 1991.

A Usina hidrelétrica de ITAIPU, a maior em operação no mundo, tem uma potência instalada de 12.600 MW (megawatts), com 18 unidades geradoras de 700 MW cada. A produção recorde de 1997, que superou 87 bilhões de Kwh (quilowatts-horas), foi responsável pelo suprimento de 88% da energia elétrica consumida no Paraguai e 25 % de toda a demanda do mercado brasileiro.

4.1.2 Turbinas Francis

Devido ao fato deste trabalho propor a criação de um índice de desempenho que acompanhe a performance de turbinas, será apresentado, com mais detalhes, as características das turbinas instaladas em ITAIPU.

São estas as características principais das turbinas de ITAIPU:

- tipo:	Francis
- potência nominal:	715 MW
- velocidade de projeto	90,9 rpm (50 Hz) e 92,3 rpm (60 Hz)
- queda para eficiência máxima	118,4 m
- queda nominal	112,9 m
- vazão para potência e queda nominal	690 m ³ /s
- peso da roda	2902 kN (290 t)
- peso do eixo	1255 kN (126 t)
- peso do anel de vedação	3826 kN (383 t)

Os testes em modelo hidráulico reduzido, realizados em acordo com a IEC 193/1965 e 193A/1972, foram conduzidos pelo Instituto de Máquinas Hidráulicas do Instituto Federal de Tecnologia de Lausanne, Suíça, durante os meses de Março e Abril de 1979.

A escala do modelo foi 1:19,7, com a roda ficando, então, com um diâmetro externo de 416 mm. As seguintes medições foram executadas durante os ensaios:

- vazão;
- queda;
- pressões na caixa espiral e tubo de sucção;
- torque;
- flutuações do torque;
- velocidades;
- esforços axiais;
- torque do servomotor.

Essas medições foram executadas para confirmarem os seguintes parâmetros:

- potências e eficiências garantidas;
- velocidade de disparo;

- existência de margens adequadas para as garantias de cavitação;
- oscilação de pressão no tubo de sucção e caixa espiral;
- oscilação de torque no eixo;
- esforço hidráulico.

Os principais resultados encontrados nos testes em modelo reduzido foram com relação aos seguintes itens:

a) eficiência e potência

Tanto os resultados encontrados pelos testes em modelo para a eficiência, como os da potência, demonstraram que os valores garantidos poderiam ser atingidos.

A fórmula de conversão do modelo para o protótipo foi especificada para ser feita com a fórmula modificada de Hutton ao invés da fórmula de Moody, indicada pela norma IEC 193, devido ao grande tamanho das unidades de ITAIPU. A fórmula de Hutton modificada é a seguinte:

$$\eta_p = X(1 - \eta_m) \left[1 - \left(\text{Re}_m / \text{Re}_p \right)^{p,2} \right] + \eta_m, \text{ onde:}$$

- η_p = eficiência do protótipo
- η_m = eficiência do modelo
- Re_m = número de Reynolds do modelo
- Re_p = número de Reynolds do protótipo
- $X = 0$ para $Q = 0,25Q_{\eta \max}$
aumentando linearmente até $X = 0,75$ para $Q_{\eta \max}$
- $Q_{\eta \max}$ = Vazão no ponto de eficiência máxima

Os valores das eficiências preditas pelo protótipo calculadas pela fórmula de Hutton são apresentados na tabela 4.1, a seguir:

Eficiência	Valor Garantido (%)	Valor medido no Modelo (%)	Valor predito pelo Protótipo (%)
ponto de eficiência máxima na altura de projeto 118,4 m	95,3	93,3	96,2
eficiência na altura de projeto 118,4 m e potência de 715 MW	94,1	92,3	95,2
eficiência média ponderada	95,0		95,9

Tabela 4.1: Eficiências garantidas, medidas e preditas pelo protótipo.
(Fonte: “ITAIPU HYDROELECTRIC PROJECT, 1994, Table 12.6, page 12.18”)

b) cavitação

As condições de fluxo observadas indicaram a necessidade de aplicação de uma proteção adicional de aço inoxidável no lado de sucção na saída das pás, para evitar erosões por cavitação.

c) estabilidade de operação e esforços hidráulicos

As medições de flutuação de torque no tubo de sucção e na caixa espiral, informaram as regiões mais problemáticas de operação das turbinas devidas à formação do vortex³. Já as medições dos esforços hidráulicos, indicaram a necessidade de algumas correções no protótipo. Efetuadas essas correções, o máximo esforço hidráulico medido no modelo e

³ Vortex: movimento de rotação da água, que favorece o aparecimento da cavitação.

convertido para o protótipo, ficou abaixo do valor garantido, ou seja, dentro dos limites especificados.

As medições efetuadas durante os testes de comissionamento confirmaram os resultados dos testes em modelo e cálculos preliminares. Além dos ensaios específicos para verificação da pressão de flutuação da caixa espiral e tubo de sucção, da medição das tensões dinâmicas nas pás fixas e deflexão sobre pressão da tampa da turbina, foi realizado ensaio de eficiência absoluta pelo método de Gibson, na Unidade 18.

Os resultados obtidos mais uma vez confirmaram a excelência do projeto das turbinas de ITAIPU.

ITAIPU, através da Superintendência de Engenharia, iniciou em 1991, um projeto para realização de ensaios de eficiência relativa, os chamados “Index Tests”, em todas as suas máquinas. O objetivo principal, além de conhecer o comportamento hidráulico de cada turbina, era o de criar um banco de dados com as informações de eficiência, vazão e potência e, assim, com a “impressão digital” de cada turbina, poder implantar um plano de operação otimizada da usina, levando em consideração parâmetros hidráulicos.

De 1991 até 1995, mesmo concorrendo com as peculiaridades de operação da usina, ou seja, dificuldade para realização dos ensaios, todas as turbinas de ITAIPU foram ensaiadas, apresentando resultados satisfatórios. A partir de 1995, porém, tendo em vista as condições de demanda do sistema, cada vez mais crítica, e da necessidade de uma programação antecipada para a realização dos ensaios de eficiência relativa, não foi possível dar continuidade a implementação do plano de operação otimizada da usina.

Com a necessidade de se repetir os ensaios para verificar se houve alteração ou não da sua eficiência, ou seja, acompanhar a sua performance ao longo do tempo, fica comprometido o projeto de se viabilizar o controle do desempenho das turbinas via ensaios de Index Test, bem como, utilizar seus resultados em programas que visem uma operação otimizada da usina.

Mais uma vez se defronta, então, com a necessidade de se estabelecer um índice de acompanhamento da performance das turbinas que seja independente da realização de algum tipo de ensaio. A seguir passa-se a apresentar os passos para implantação prática de um índice de desempenho utilizando gráficos de controle .

4.2 Aplicação Prática da Metodologia

A fim de estruturar as atividades a serem executadas, procurou-se separar a aplicação prática da metodologia proposta em dois tópicos distintos. O primeiro tópico, chamado de “Memória de Cálculos”, tem como objetivo principal a apresentação dos dados e considerações efetuados durante a fase de obtenção do índice de desempenho, buscando, com isso, uma padronização das atividades. O segundo tópico, chamado de “Aplicação Prática”, apresenta as demais etapas necessárias para a implementação da metodologia proposta, segundo o fluxograma mostrado no item 3.3.

4.2.1 Memória de Cálculos

O objetivo básico desta etapa é montar uma estrutura que dê suporte à fase de obtenção do índice de desempenho, com a memória dos cálculos utilizados.

Os cálculos efetuados foram os seguintes:

1. transformação do valor de abertura do distribuidor

Tendo em vista, que o dado cadastrado nas planilhas da operação, com relação a abertura do distribuidor, se refere ao valor lido no painel do regulador eletrônico de velocidade (TGC), através da tensão do variômetro de abertura das palhetas do distribuidor, é necessário se conhecer os valores dos resultados das aferições realizadas nestes equipamentos. Esta necessidade se deve ao fato da premissa de se transformar a indicação dada pelo voltímetro do TGC em “V” (volts) para “mm” (milímetros).

Na aferição é encontrada uma equação polinomial de quinto grau, que define a relação de transformação da tensão. Devido à importância desta aferição nos resultados, será

mostrado a seguir a última equação de aferição de cada máquina, sendo que apenas os resultados das unidades 05 e 17 se encontram pendentes:

$$U - 01 \Rightarrow CS = 0,008653846V^5 - 0,1280594V^4 - 0,6181527V^3 + 15,70498V^2 + 18,98013V - 0,3881121$$

$$U - 02 \Rightarrow CS = 0,005769231V^5 - 0,07692308V^4 - 0,7829254V^3 + 14,40559V^2 + 26,27366V - 0,1958042$$

$$U - 03 \Rightarrow CS = 0,0072115V^5 - 0,0864657V^4 - 0,85205V^3 + 14,3289V^2 + 28,9608V - 0,55$$

$$U - 04 \Rightarrow CS = -0,003365385V^5 + 0,126384V^4 - 2,20389V^3 + 17,03446V^2 + 30,39432V - 0,4283217$$

$$U - 06 \Rightarrow CS = -0,00320512V^5 + 0,164918V^4 - 3,125V^3 + 23,715V^2 + 15,108V - 0,38$$

$$U - 07 \Rightarrow CS = 0,003205128V^5 - 0,001165503V^4 - 1,736305V^3 + 20,34499V^2 + 12,01166V - 0,1298742$$

$$U - 08 \Rightarrow CS = 0,0099359V^5 - 0,168561V^4 - 0,0517179V^3 + 11,587V^2 + 31,2562V - 0,87$$

$$U - 09 \Rightarrow CS = -0,00384615V^5 + 0,184149V^4 - 3,17308V^3 + 22,1072V^2 + 23,17V - 0,26$$

$$U - 10 \Rightarrow CS = 0,0011218V^5 + 0,059659V^4 - 2,24089V^3 + 20,8719V^2 + 17,33V - 0,45$$

$$U - 11 \Rightarrow CS = 0,00208334V^5 + 0,053103V^4 - 2,40741V^3 + 22,8618V^2 + 10,912V - 0,53$$

$$U - 12 \Rightarrow CS = 0,0081731V^5 - 0,148674V^4 - 0,010998V^3 + 10,7221V^2 + 33,623V - 0,04$$

$$U - 13 \Rightarrow CS = 0,0040064V^5 - 0,02091V^4 - 1,38906V^3 + 16,9405V^2 + 23,1525V - 0,15$$

$$U - 14 \Rightarrow CS = 0,0059295V^5 - 0,024694V^4 - 1,76872V^3 + 19,4967V^2 + 19,9988V - 0,599$$

$$U - 15 \Rightarrow CS = 0,00432693V^5 + 0,00779418V^4 - 1,99585V^3 + 20,3197V^2 + 18,29V - 0,24$$

$$U - 16 \Rightarrow CS = 0,00689103V^5 - 0,0711685V^4 - 1,09666V^3 + 15,9336V^2 + 25,4843V - 0,32$$

$$U - 18 \Rightarrow CS = 0,0099359V^5 - 0,1761363V^4 + 0,127768V^3 + 10,3218V^2 + 33,36346V + 0,0524476$$

Já a relação, que é válida para todas as unidades, utilizada para a transformação entre o curso do servomotor (CS) e a abertura das palhetas do distribuidor (mm) é a seguinte:

$$a = 0,0000356608CS^2 + 0,846171CS - 40,9168$$

Esta relação resulta da média dos valores dos protocolos de montagem das turbinas, e dá resultados satisfatórios para todas as turbinas de ITAIPU.

2. ajustamento das curvas do modelo reduzido

Conforme mencionado no capítulo 3, o procedimento que automatiza a transposição do modelo para o protótipo, utiliza equações polinomiais ajustadas de quarto grau, para cada patamar de abertura testado no modelo reduzido. São estas as equações utilizadas:

- ajustamento da variável rendimento (η) em função de rotação unitária (n_{11})

Abertura 12,5

$$\eta = -124,3128 + 6,813213n_{11} - 0,138944n_{11}^2 + 0,001258925n_{11}^3 - 4,280137e-6n_{11}^4$$

Abertura 15

$$\eta = -8,094855 + 0,4571899n_{11} - 0,00888485n_{11}^2 + 7,887425e-5 n_{11}^3 - 2,726008e-7 n_{11}^4$$

Abertura 17,5

$$\eta = -8,090983 + 0,4678935n_{11} - 0,009168938n_{11}^2 + 8,099406e-5 n_{11}^3 - 2,751495e-7 n_{11}^4$$

Abertura 19

$$\eta = -30,94848 + 1,726096n_{11} - 0,03501535n_{11}^2 + 0,0003159523 n_{11}^3 - 1,072611e-6 n_{11}^4$$

Abertura 20

$$\eta = -19,33275 + 1,066976n_{11} - 0,02106651n_{11}^2 + 0,0001854927 n_{11}^3 - 6,175095e-7 n_{11}^4$$

Abertura 21,5

$$\eta = 7,468033 - 0,3836762n_{11} + 0,008174978n_{11}^2 - 7,470715e-5 n_{11}^3 + 2,451774e-7 n_{11}^4$$

Abertura 23

$$\eta = 29,23717 - 1,547271n_{11} + 0,03132782n_{11}^2 - 0,0002780791 n_{11}^3 + 9,110784e-7 n_{11}^4$$

Abertura 25

$$\eta = -1,417589 + 0,126197n_{11} - 0,002825541n_{11}^2 + 3,053423e-5 n_{11}^3 - 1,301338e-7 n_{11}^4$$

Abertura 27,5

$$\eta = 27,70038 - 1,526416n_{11} + 0,03215438n_{11}^2 - 0,0002970009 n_{11}^3 + 1,014649e-6 n_{11}^4$$

Abertura 28,5

$$\eta = 27,03746 - 1,4866n_{11} + 0,03124011n_{11}^2 - 0,0002876349 n_{11}^3 + 9,785638e-7 n_{11}^4$$

Abertura 30,4

$$\eta = 18,79482 - 1,03342n_{11} + 0,02191157n_{11}^2 - 0,0002025899 n_{11}^3 + 6,884984e-7 n_{11}^4$$

- ajustamento da variável vazão unitária (q_{11}) em função de rotação unitária (n_{11})

Abertura 12,5

$$Q_{11} = -39,77403 + 2,219395n_{11} - 0,04564797n_{11}^2 + 0,0004152954n_{11}^3 - 1,411648e-6 n_{11}^4$$

Abertura 15

$$Q_{11} = -2,601411 + 0,1858568n_{11} - 0,003965733n_{11}^2 + 3,697388e-5n_{11}^3 - 1,286788e-7 n_{11}^4$$

Abertura 17,5

$$Q_{11} = 4,388817 - 0,1899226n_{11} + 0,003702317n_{11}^2 - 3,237557e-5n_{11}^3 + 1,057103e-7n_{11}^4$$

Abertura 19

$$Q_{11} = -14,00057 + 0,8178293n_{11} - 0,01685348n_{11}^2 + 0,0001532808n_{11}^3 - 5,209003e-7n_{11}^4$$

Abertura 20

$$Q_{11} = -0,6867663 + 0,06722944n_{11} - 0,0009746221n_{11}^2 + 4,336226e-6n_{11}^3 + 1,558827e-9n_{11}^4$$

Abertura 21,5

$$Q_{11} = 12,12643 - 0,6182382n_{11} + 0,01268956n_{11}^2 - 0,0001153767n_{11}^3 + 3,903149e-7n_{11}^4$$

Abertura 23

$$Q_{11} = 19,53533 - 1,006464n_{11} + 0,02030352n_{11}^2 - 0,0001811791n_{11}^3 + 6,018784e-7n_{11}^4$$

Abertura 25

$$Q_{11} = 1,431034 - 0,01960068n_{11} + 0,0002418138n_{11}^2 - 4,20171e-7n_{11}^3 - 6,926351e-9n_{11}^4$$

Abertura 27,5

$$Q_{11} = 17,99706 - 0,9551741n_{11} + 0,02003787n_{11}^2 - 0,0001856276n_{11}^3 + 6,395393e-7n_{11}^4$$

Abertura 28,5

$$Q_{11} = 18,49034 - 0,9791267n_{11} + 0,0204803n_{11}^2 - 0,0001890903n_{11}^3 + 6,489988e-7n_{11}^4$$

Abertura 30,4

$$Q_{11} = 13,93154 - 0,7297096n_{11} + 0,01542897n_{11}^2 - 0,0001436816n_{11}^3 + 4,959651e-7n_{11}^4$$

3. dados e considerações para cálculo da transposição do modelo para o protótipo

- $n = 90,9 \text{ rpm (50 Hz)}$ e $92,3 \text{ rpm (60 Hz)}$;
- $D_m = 0,416 \text{ m}$;
- $H_m = 15 \text{ m}$;
- $g_m = 9,806 \text{ m/s}^2$;
- $v_m = 1,145 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;
- $D_p = 8,1 \text{ m}$;

- $g_p = 9,789 \text{ m/s}^2$;
- $v_p = 1,004 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, considerado $\Theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Perda de carga = 1,6 m

(Referência: "ITAIPU HYDROELECTRIC PROJECT, Table 12.3 - Design net heads and approximate outputs - Penstock losses (m) - Design", página 12.14)

4. cálculo da potência esperada e índice de desempenho

A potência esperada foi calculada utilizando-se o procedimento descrito no capítulo 3, tendo como dados de entrada:

- frequência da turbina (50 ou 60 Hz);
- altura de queda bruta em metros;
- abertura do servomotor em milímetros.

Já o índice de desempenho foi obtido dividindo-se o valor da potência real gerada, pelo valor da potência esperada.

5. arquivos com os banco de dados

Os arquivos com os dados necessários para a construção dos gráficos de controle foram denominados de planilhas e, para facilitar a sua identificação foram classificados de acordo com a unidade correspondente. Como por exemplo, a unidade 01, tem o nome de planilha 01 e assim por diante, até a unidade 18.

4.2.2 Aplicação Prática

Seguindo o fluxograma mostrado no item 3.3, apresenta-se a seguir, os outros passos necessários à implementação da metodologia proposta.

1 Escolha do tipo de Gráfico de Controle

O gráfico de controle escolhido foi o MA (média móvel). Como já foi visto no capítulo 3, a escolha do tipo de gráfico de controle depende da natureza das medições e dos custos envolvidos.

De acordo com as características apresentadas no capítulo 2, o gráfico de controle por variável mais adequado para este trabalho é o do tipo MA, pois a característica de tendência é melhor representada por este tipo de gráfico, sendo, por isso, mais representativo e compreensível.

2 Determinação dos Limites de Controle

Considerou-se como limites de controle o uso de + ou - 3 desvios padrões.

3 Construção dos Gráficos de Controle

A etapa de Construção dos Gráficos de Controle, passa pela definição do tamanho de amostra e a de coleta de dados. ITAIPU possui um banco de dados com informações horárias de produção das variáveis Queda Bruta e Potência Real Gerada, o mesmo não acontecendo com a variável Abertura do Servomotor.

Foi necessário, então, recorrer aos arquivos da Superintendência de Operação, para obter este valor, que por sua vez só estavam acessíveis a partir de 1995, devido a uma recente mudança. Definido o período a ser considerado, 1995, 1996 e 1997 e, tendo em vista, o número de unidades envolvidas, dezoito turbinas, limitou-se o tamanho da amostra em 150 (cento e cinquenta) medidas no período, ou seja, 50 (cinquenta) por ano, ou 1 (uma) a cada semana.

Considera-se que para o estudo desejado, o tamanho da amostra seja suficiente para mostrar o comportamento da turbina no período considerado.

Com a ajuda do setor de informática da entidade, foi possível criar uma planilha inicial com os dados de produção da usina no período considerado, ou seja,

valores de queda bruta e potência real gerada de todas as unidades. O valor de abertura do distribuidor foi obtido diretamente das planilhas de operação.

Estes dados iniciais, mais os dados da potência esperada, calculados pelo procedimento descrito no capítulo 3, geraram arquivos contendo todas as variáveis necessárias para a construção dos gráficos de controle de cada turbina da ITAIPU.

Para a construção dos gráficos de controle foi utilizado o software estatístico "STATISTICA® (Release 5, '97 Edition)", utilizando a opção "Quality Control" e gráfico para variáveis tipo "Moving Average - MA".

Os gráficos de controle, construídos em função da variável índice de desempenho, foram executados em 16 (dezesesseis) turbinas instaladas em ITAIPU. Os resultados alcançados são mostrados nas figuras 4.1 a 4.16.

4 Avaliação dos Resultados

Para fazer a análise dos resultados mostrados pelos gráficos de controle é necessário, primeiramente, conhecer alguns aspectos relevantes com relação à questão da operação e comercialização da potência instalada da usina hidrelétrica de ITAIPU. Estas são as principais características de ITAIPU:

1. é uma usina a fio d'água, ou seja, não retém água;
2. não vende energia e sim potência;
3. usina é dividida em dois setores, um de 60 Hz (Brasil), com 9 unidades e outro de 50 Hz (Paraguai), também com 9 unidades;
4. conforme tratado de ITAIPU, toda a demanda de energia produzida pelo setor de 50 Hz e não consumida pelo Paraguai, é comprada pelo Brasil;

5. a contratação da potência instalada de ITAIPU é estabelecida para atender o intercâmbio com a ANDE (Paraguai) e ELETROBRÁS (Brasil), sendo dividida em energia disponível para contratação e aquela devido a indisponibilidade das unidades em manutenção, ao consumo próprio, reserva ou compensação;
6. adota-se a política de manutenção preventiva de duas (2) unidades geradoras à cada período. O cronograma de parada para manutenção preventiva das unidades geradoras pode ser alterado de acordo com as necessidades do sistema;
7. não existem critérios uniformes, variando de operador para operador, com relação a programação de carga variável e respectiva distribuição de carga entre as unidades geradoras;
8. unidades 01, 02 e 03, do setor de 50 Hz, estão preparadas para operar em baixa carga, com sistema de injeção de ar comprimido.

A análise destas características de operação e comercialização da potência instalada em ITAIPU, é de vital importância para o estudo que ora se propõe, pois estas particularidades, que são fatores inerentes ao processo, influem, e muito, nas condições operativas de cada turbina.

A seguir serão apresentadas as figuras 4.1 a 4.16.

Gráfico MA - Unidade 01

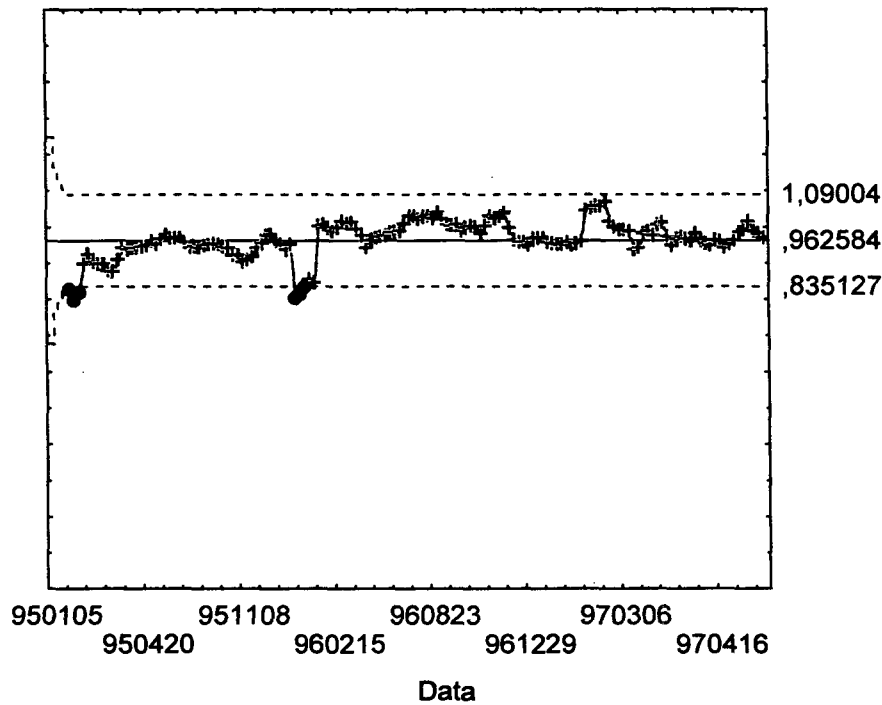
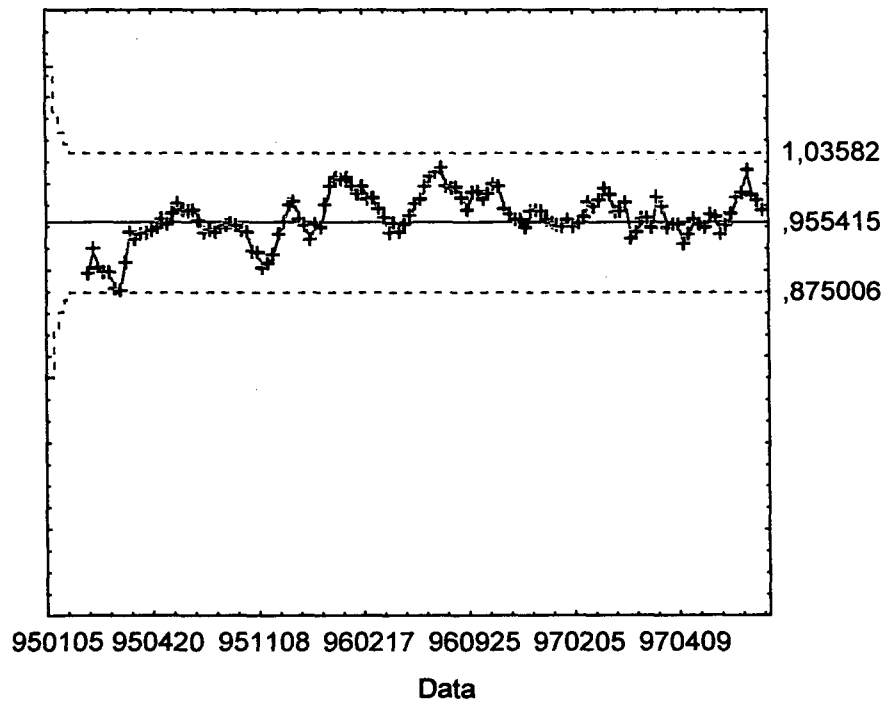


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 01



Manutenções realizadas em 23/05 a 30/06/95 e 08/07 a 24/07/96

Figura 4.1: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 01

Gráfico MA - Unidade 02

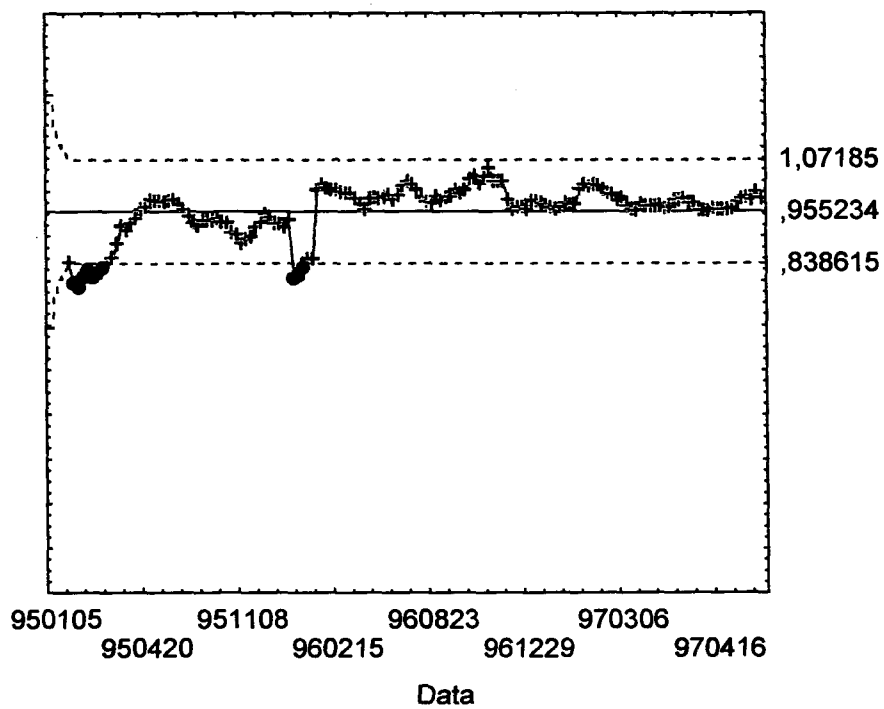
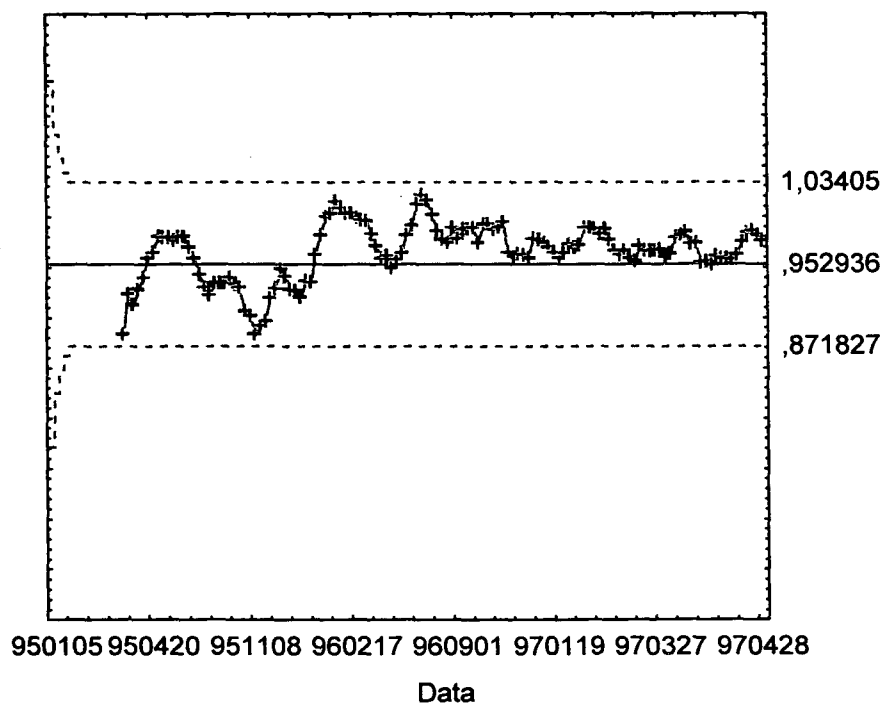


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 02



Manutenções realizadas em 27/11 a 21/12/95 e 03/12 a 13/12/96

Figura 4.2: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 02

Gráfico MA - Unidade 03

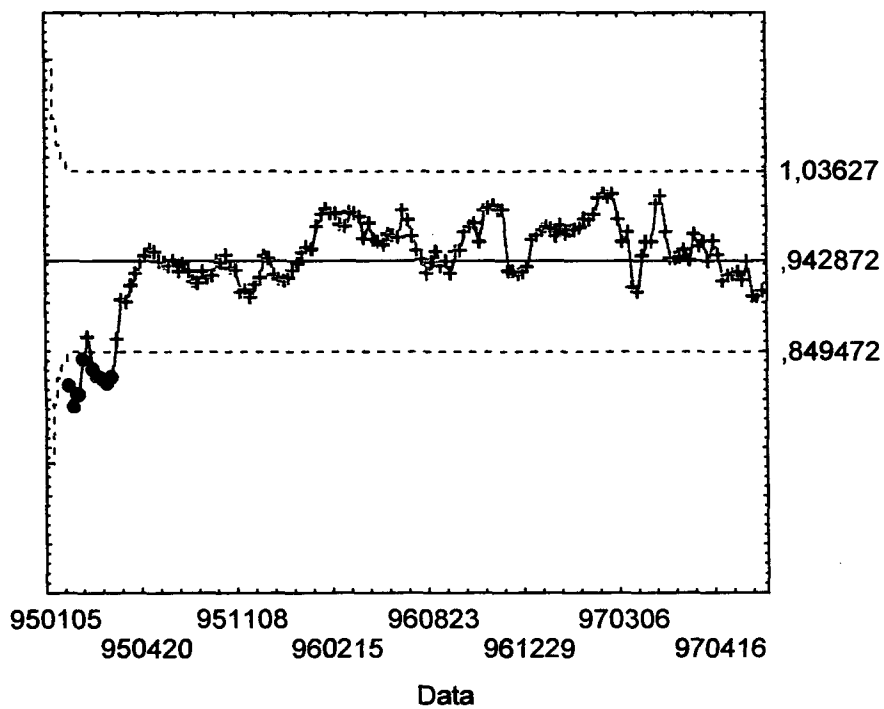
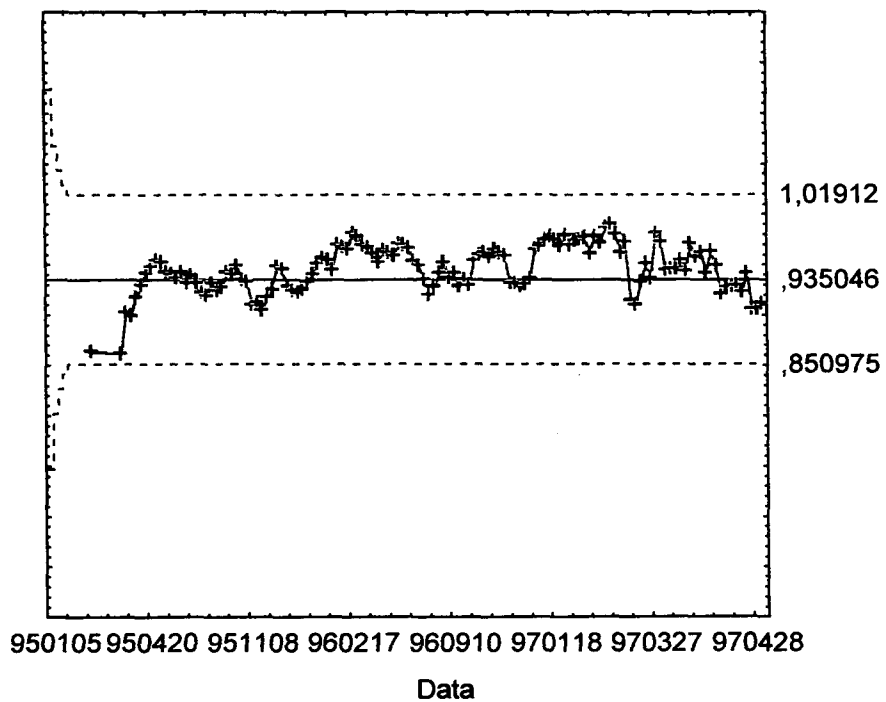
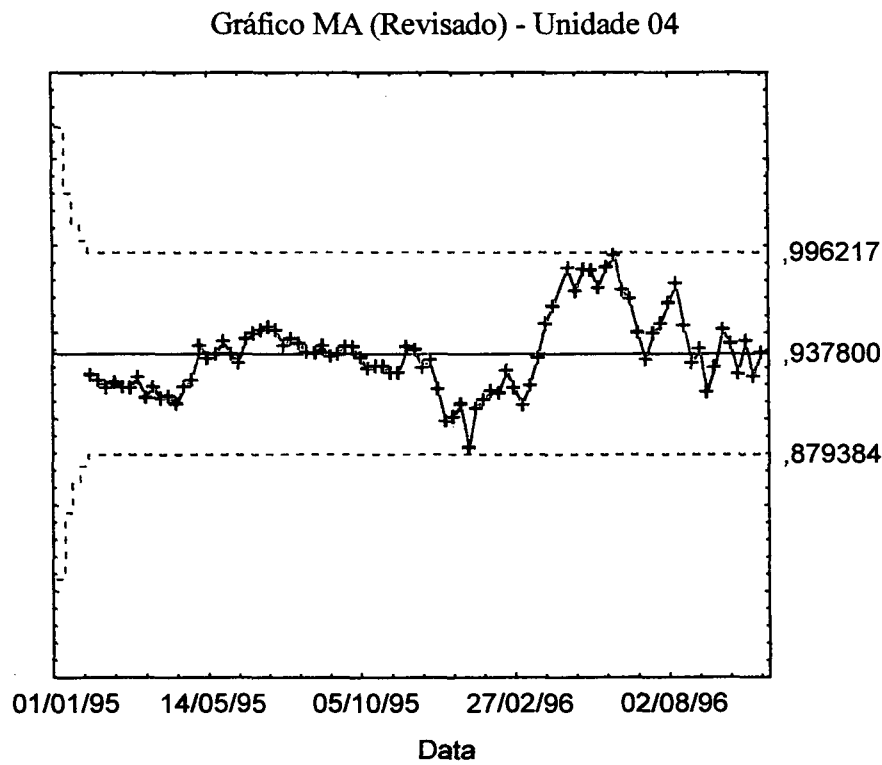
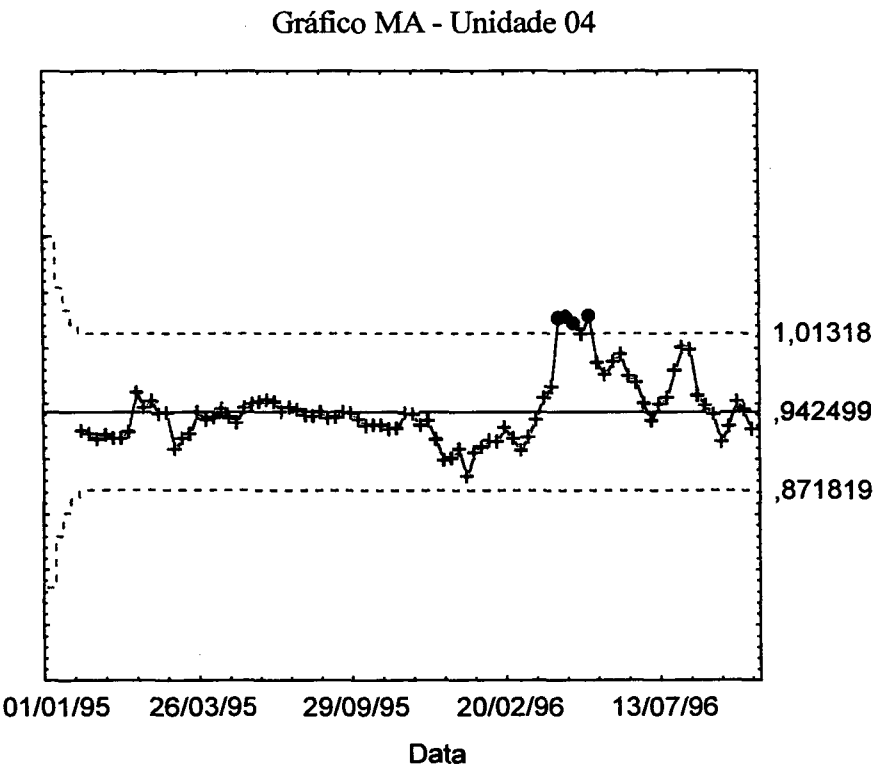


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 03



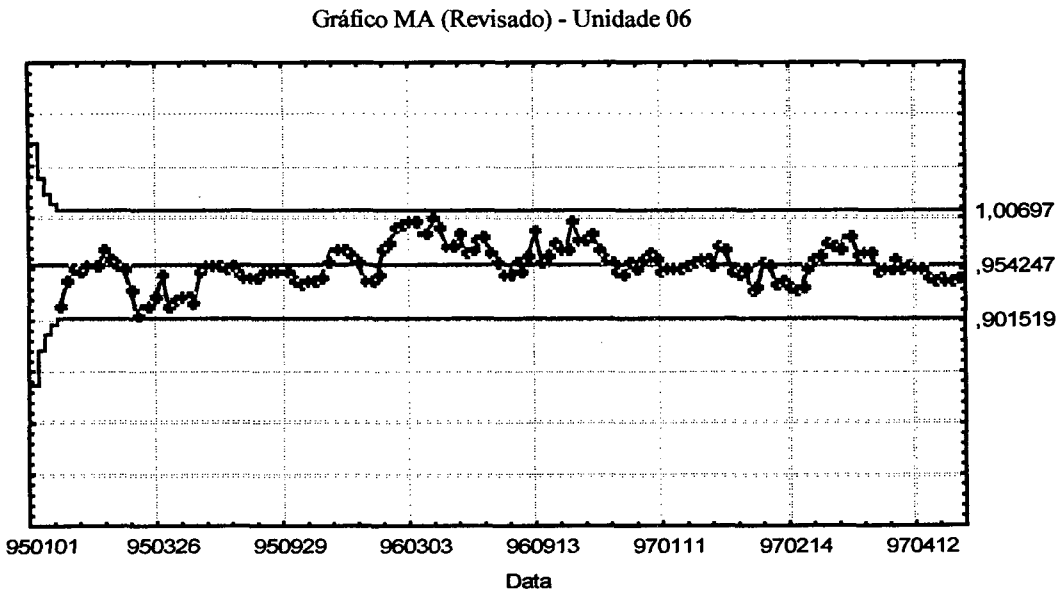
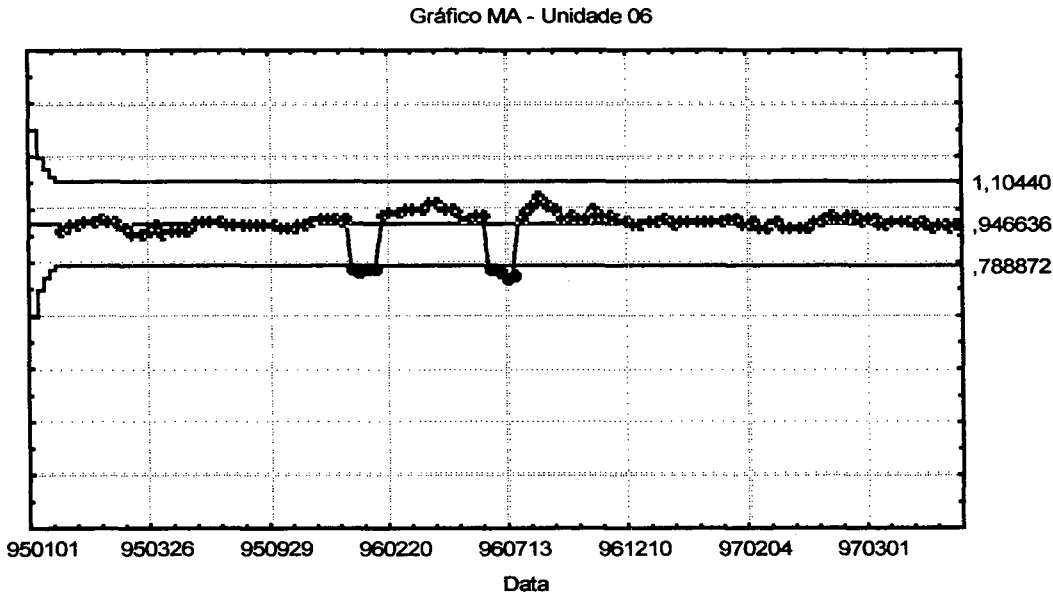
Manutenções realizadas em 10/07 a 10/08/95 e 29/07 a 13/08/96

Figura 4.3: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 03



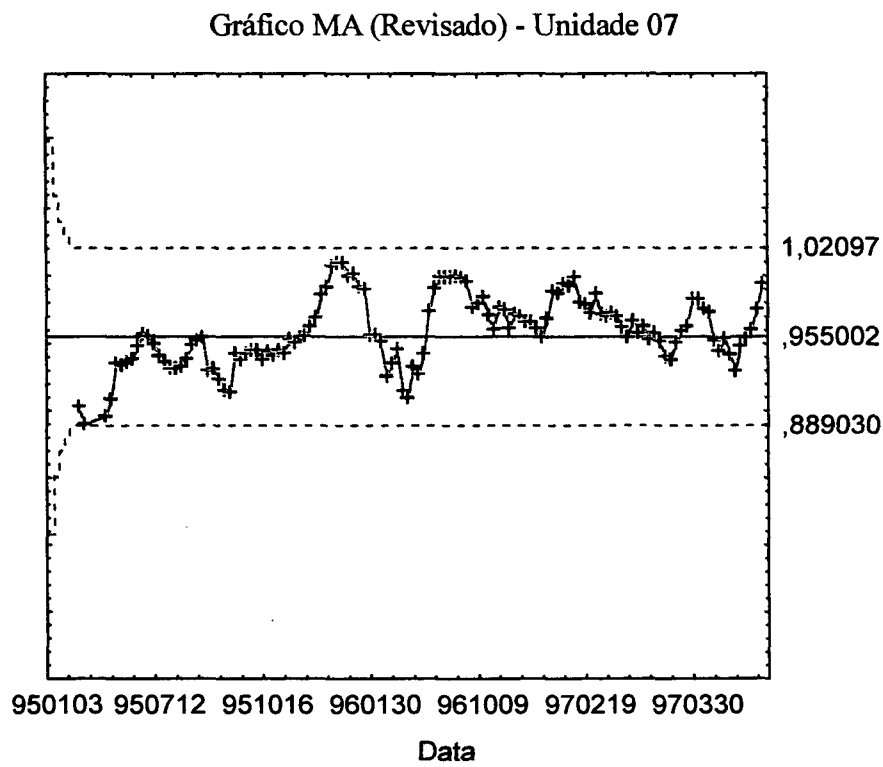
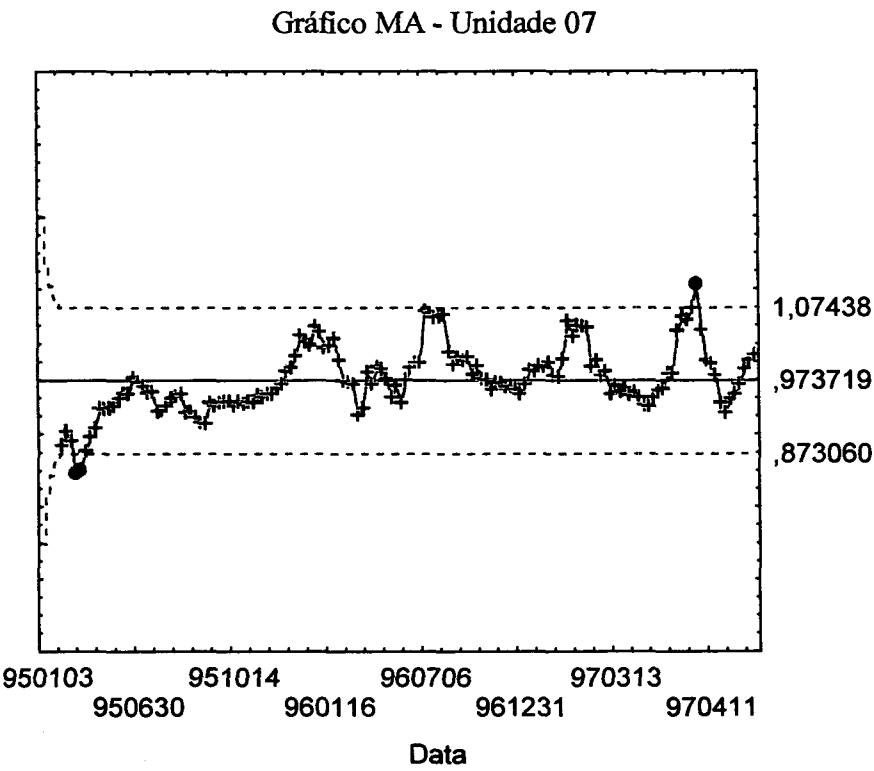
Manutenções realizadas em 27/03 a 19/04/95 , 05/03 a 22/03/96 e 31/03 a 10/04/97

Figura 4.4: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 04



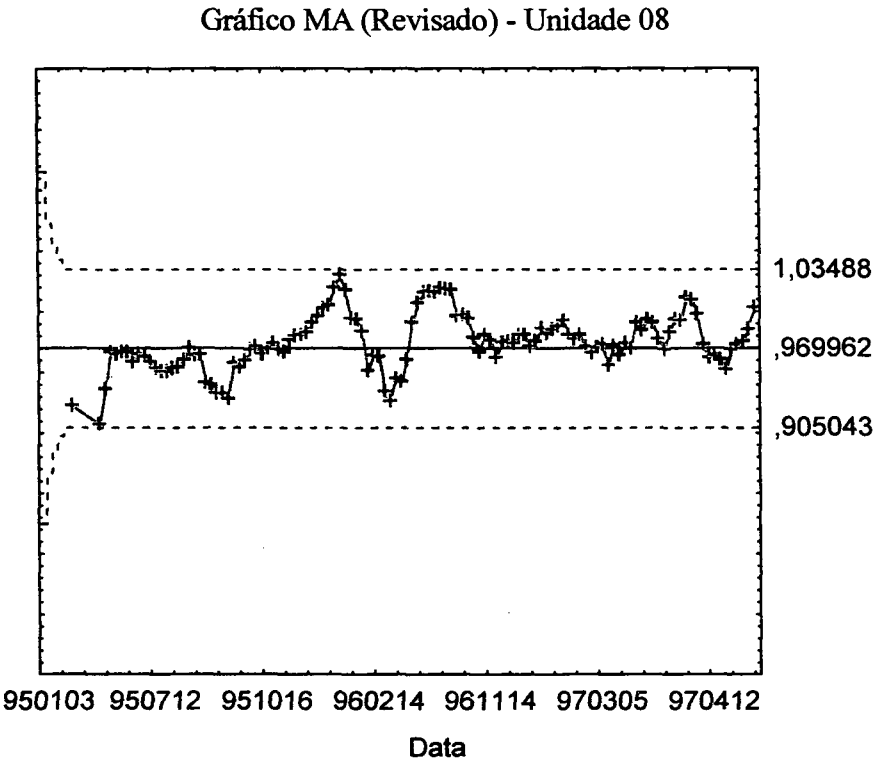
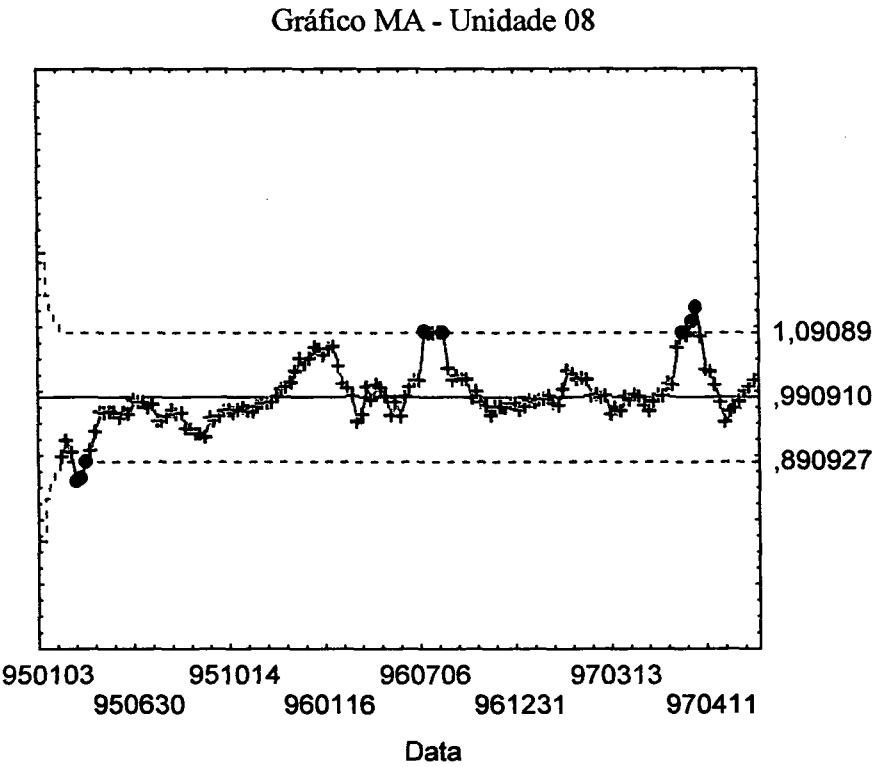
Manutenções realizadas em 17/04 a 12/05/95 e 12/06 a 23/06/96

Figura 4.5: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 06



Manutenções realizadas em 02/03 a 06/04/95 e 25/03 a 09/04/96

Figura 4.6: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 07



Manutenções realizadas em 14/08 a 05/09/95, 24/10 a 01/11/96 e 13/01 a 27/01/97

Figura 4.7: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 08

Gráfico MA - Unidade 09

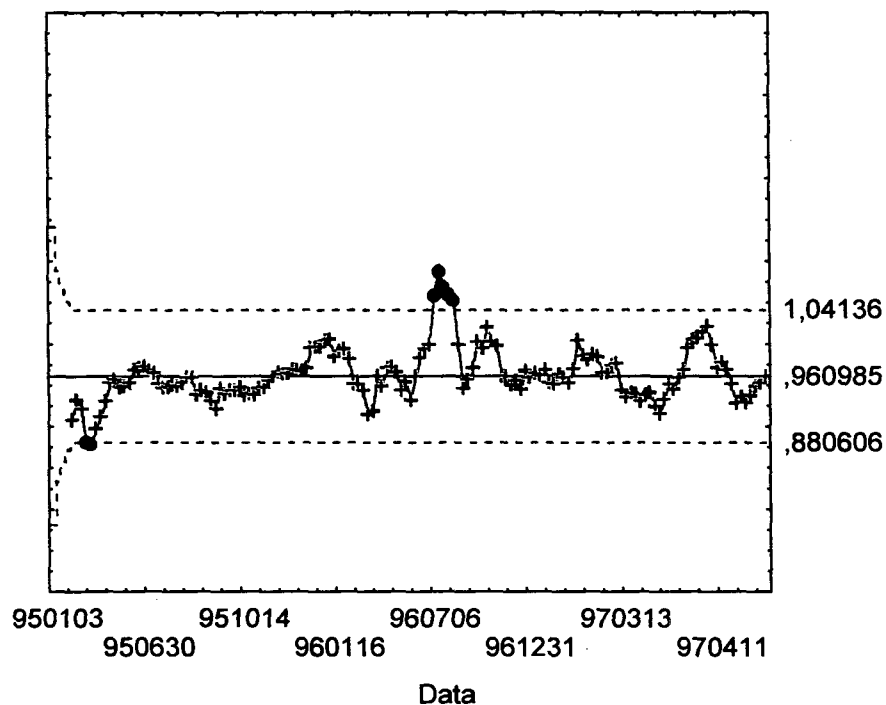
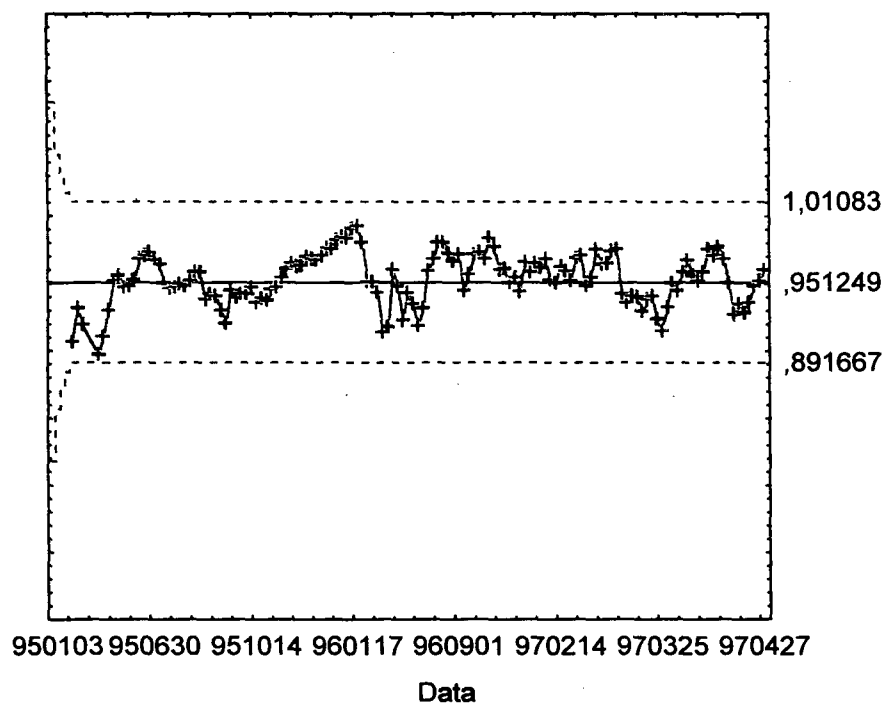
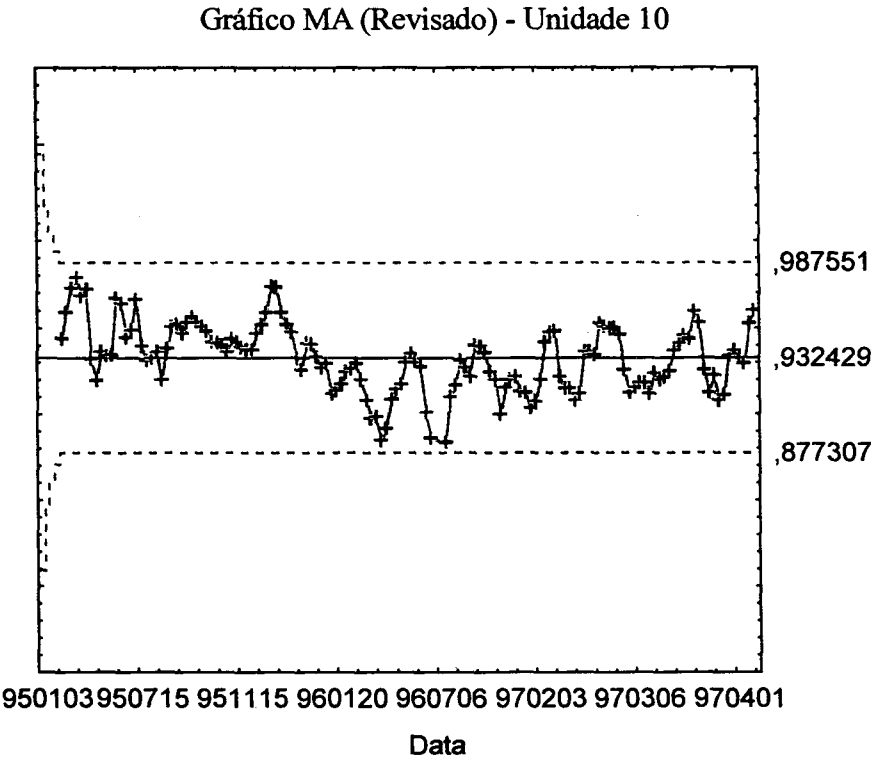
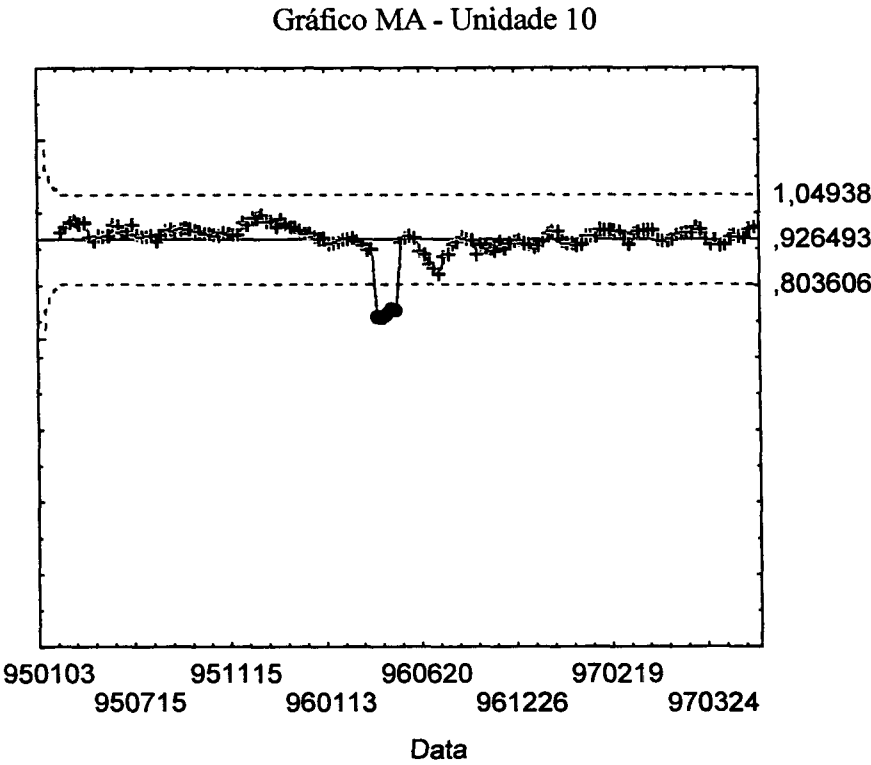


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 09



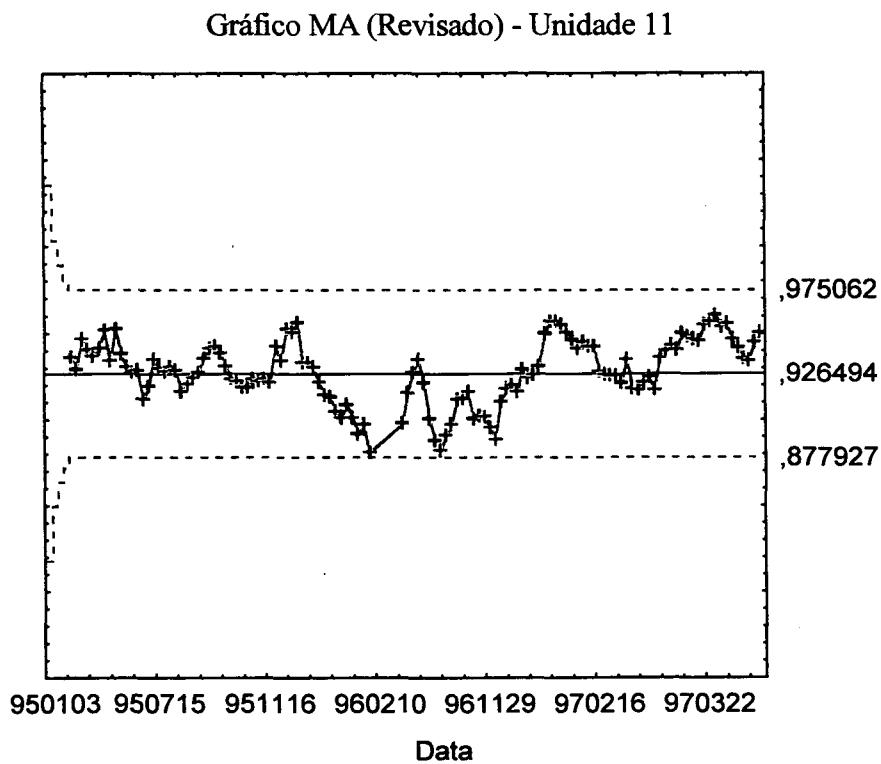
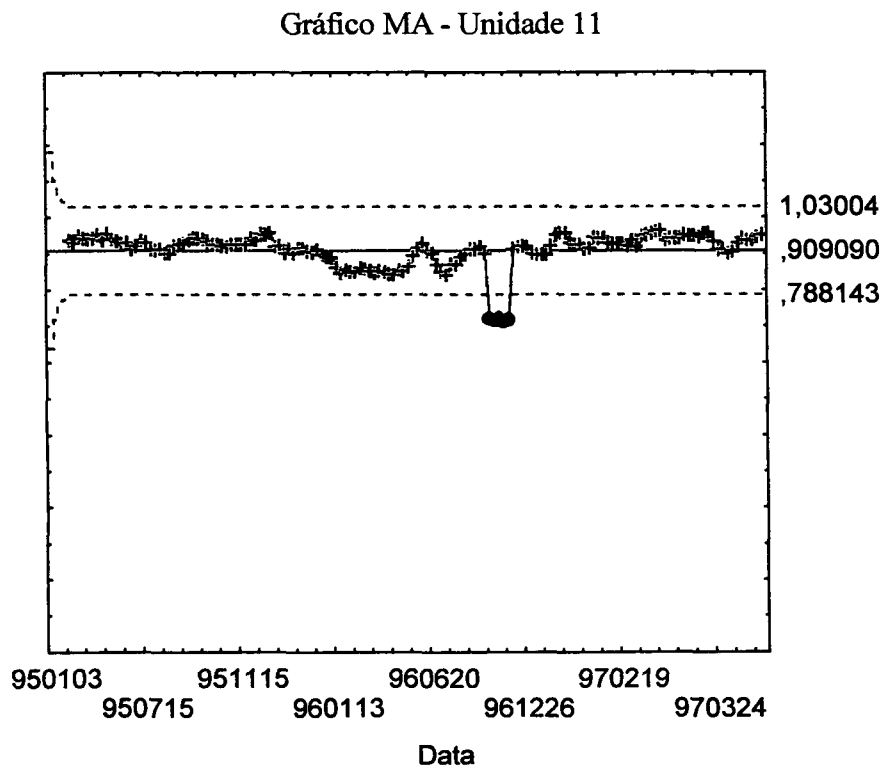
Manutenções realizadas em 17/10 a 16/11/95 e 18/11 a 26/11/96

Figura 4.8: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 09



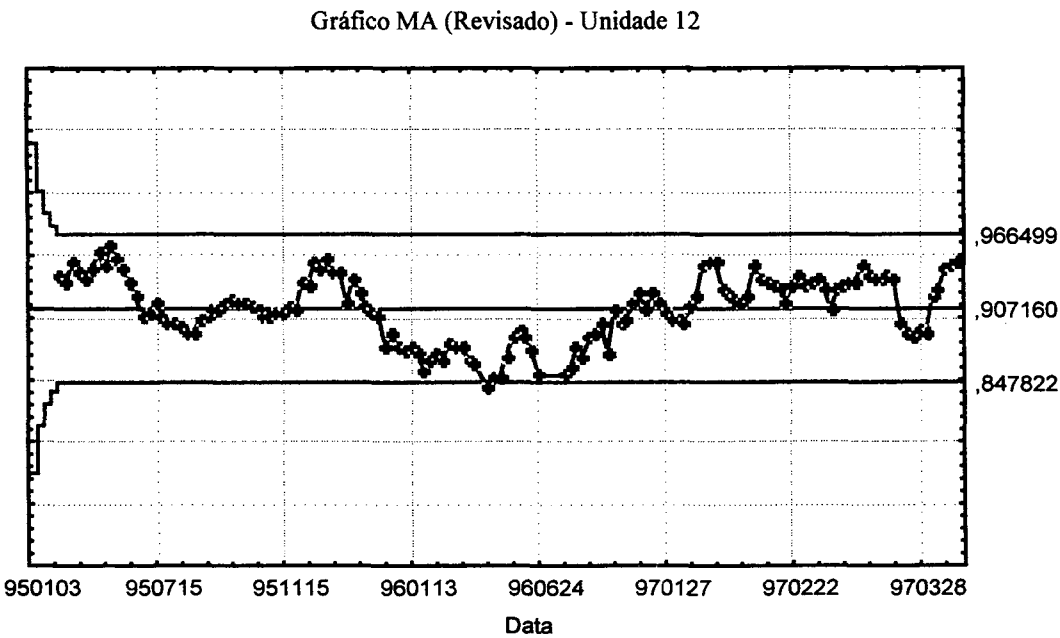
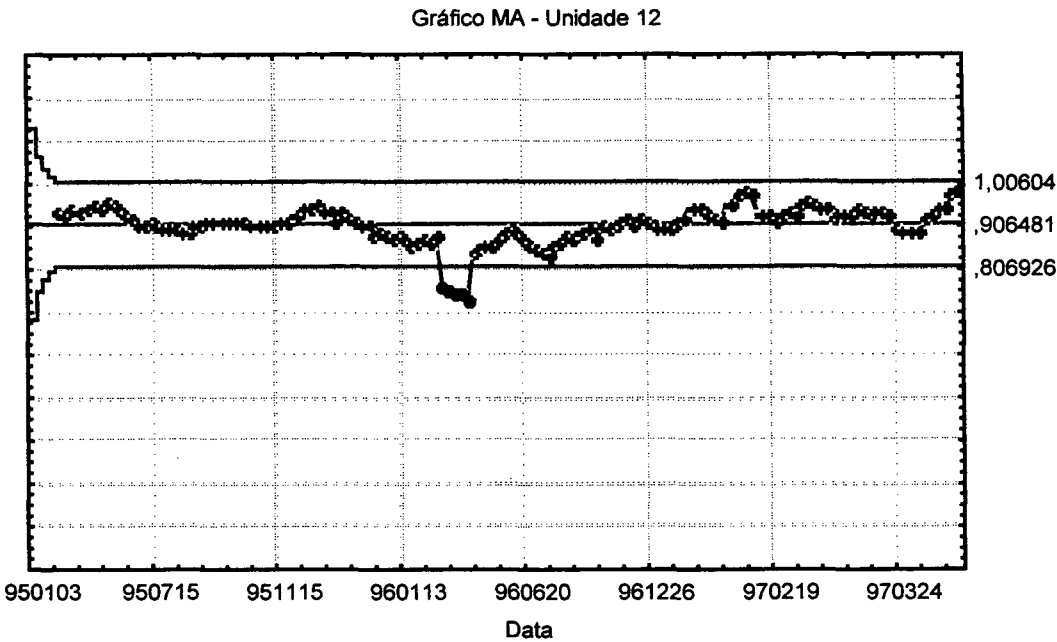
Manutenções realizadas em 24/04 a 23/05 e 10/07 a 16/08/96

Figura 4.9: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 10



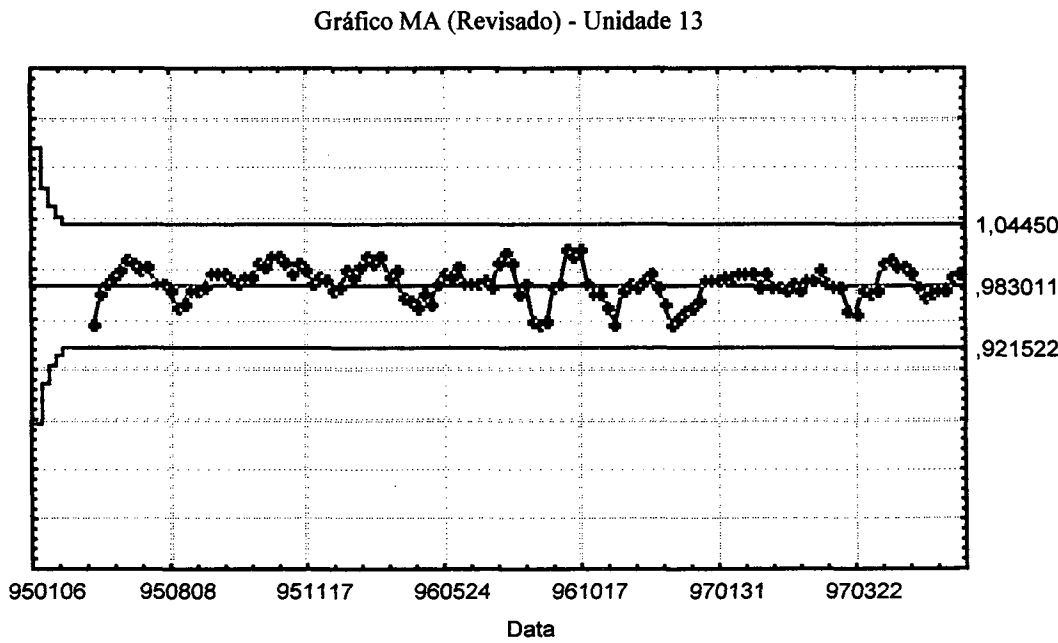
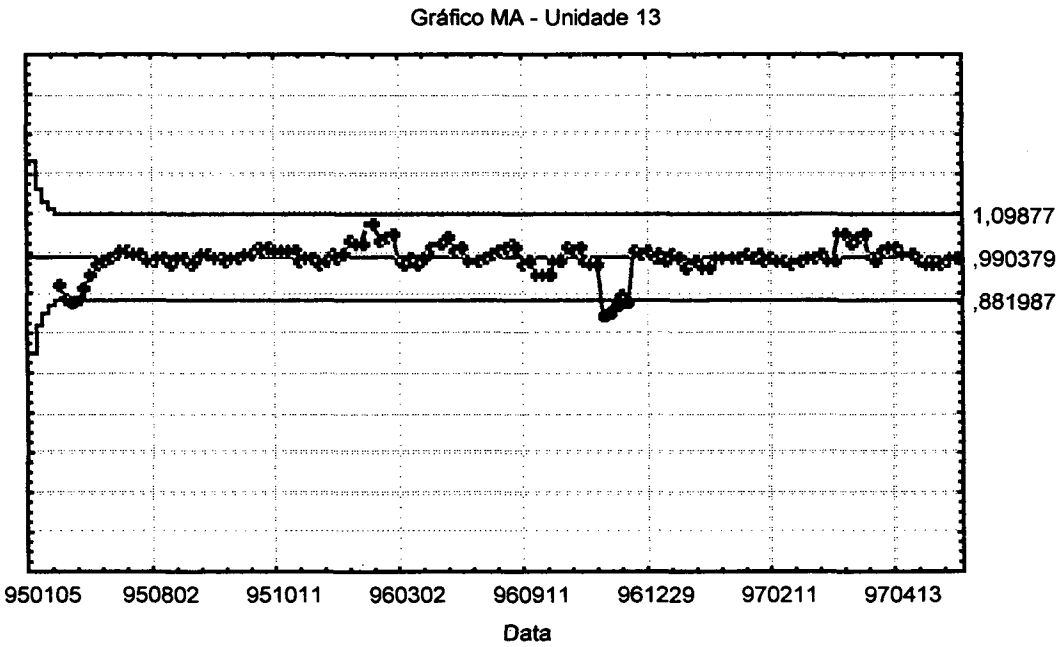
Manutenções realizadas em 31/01 a 21/02/95 e 22/04 a 24/05/96

Figura 4.10: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 11



Manutenções realizadas em 17/04 a 12/05/95 e 12/06 a 23/06/96

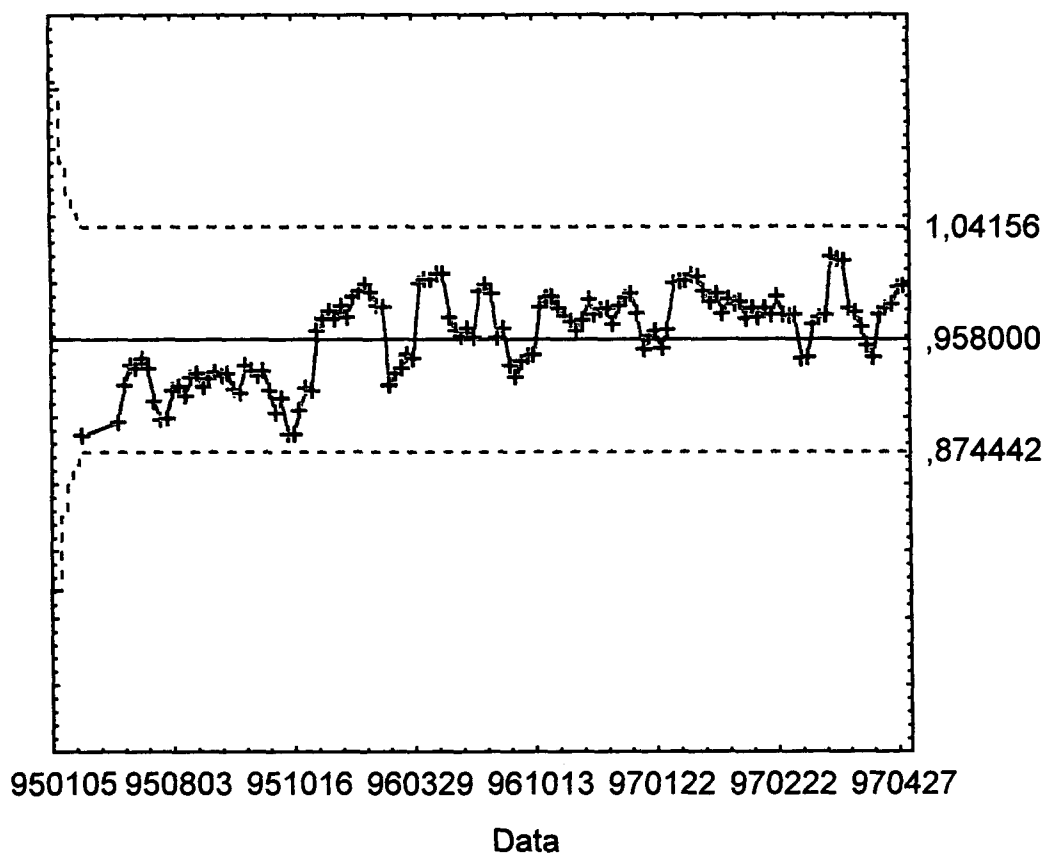
Figura 4.11: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 12



Manutenções realizadas em 18/09 a 10/10/95 e 11/11 a 09/12/96

Figura 4.12: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 13

Gráfico MA - Unidade 14



Manutenções realizadas em 25/01 a 18/02/95, 08/01 a 29/01/96 e 05/03 a 21/03/97

Figura 4.13: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 14

Gráfico MA - Unidade 15

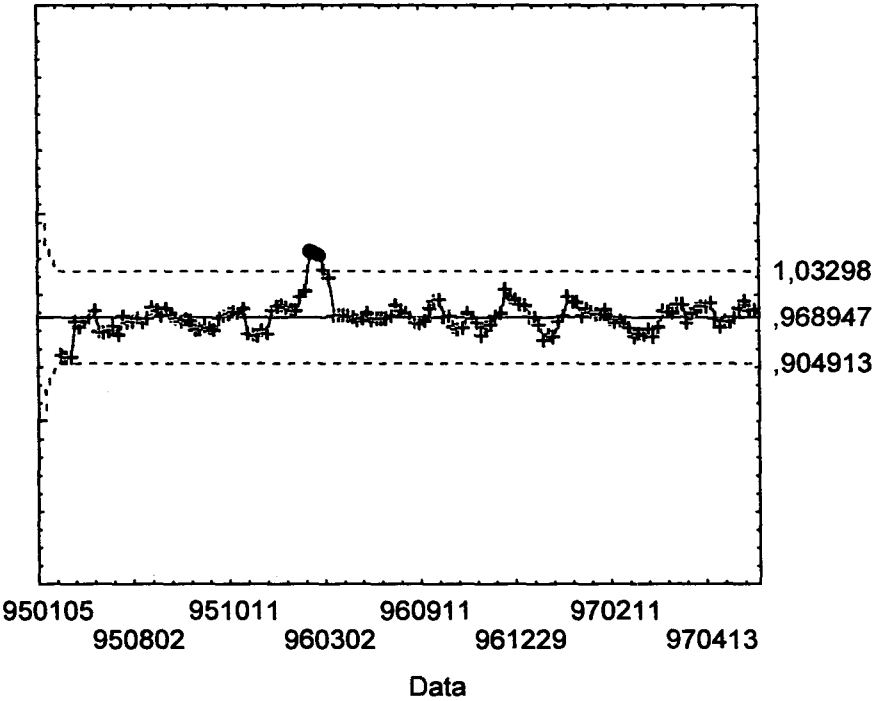
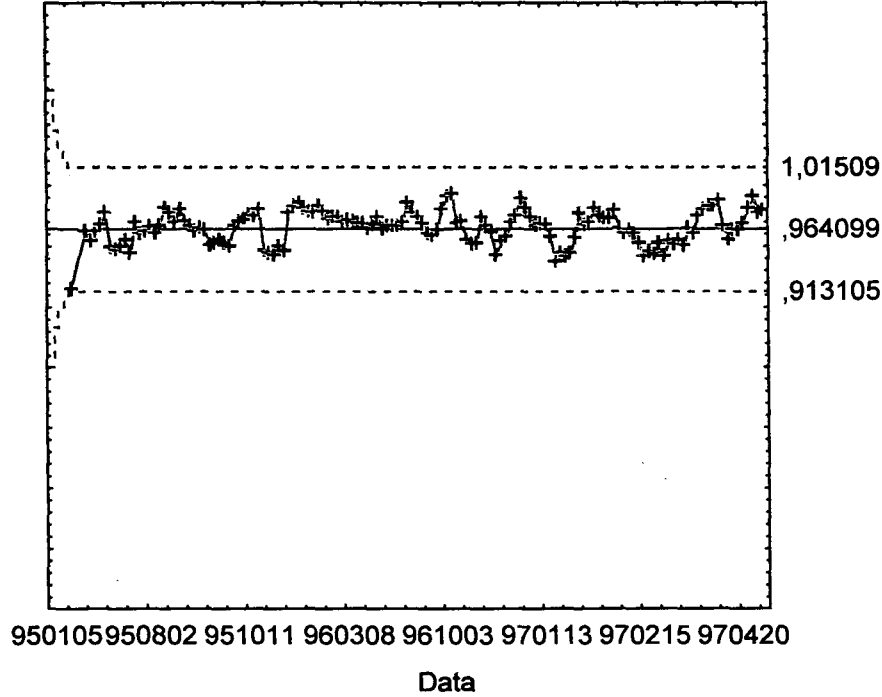


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 15



Manutenções realizadas em 26/06 a 14/07/95 e 07/08 a 06/09/96

Figura 4.14: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 15

Gráfico MA - Unidade 16

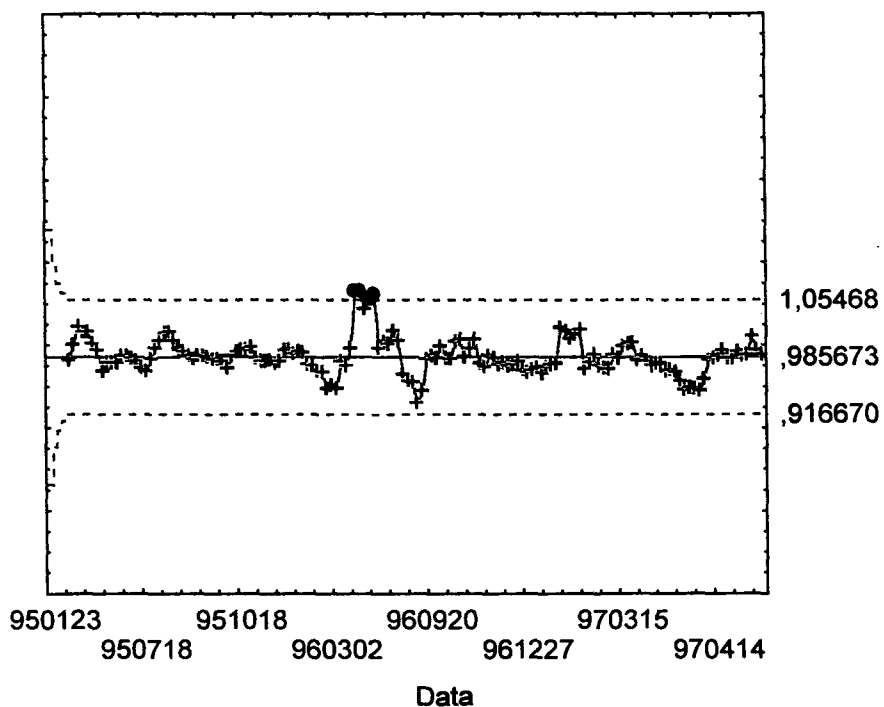
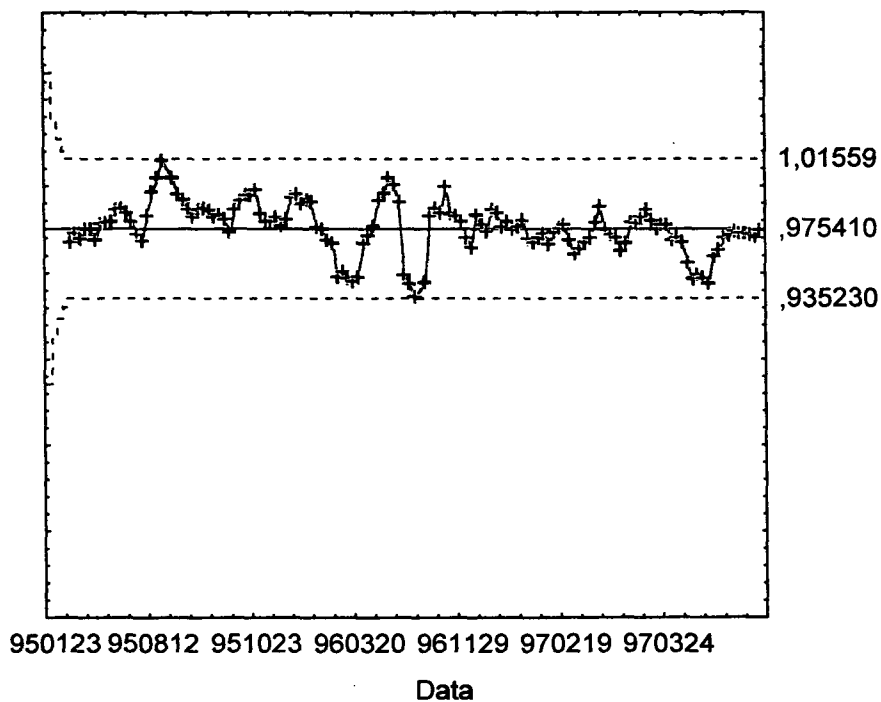


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 16



Manutenções realizadas em 02/03 a 18/03/95, 01/11 a 29/11/95 e 30/09 a 07/11/96

Figura 4.15: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 16

Gráfico MA - Unidade 18

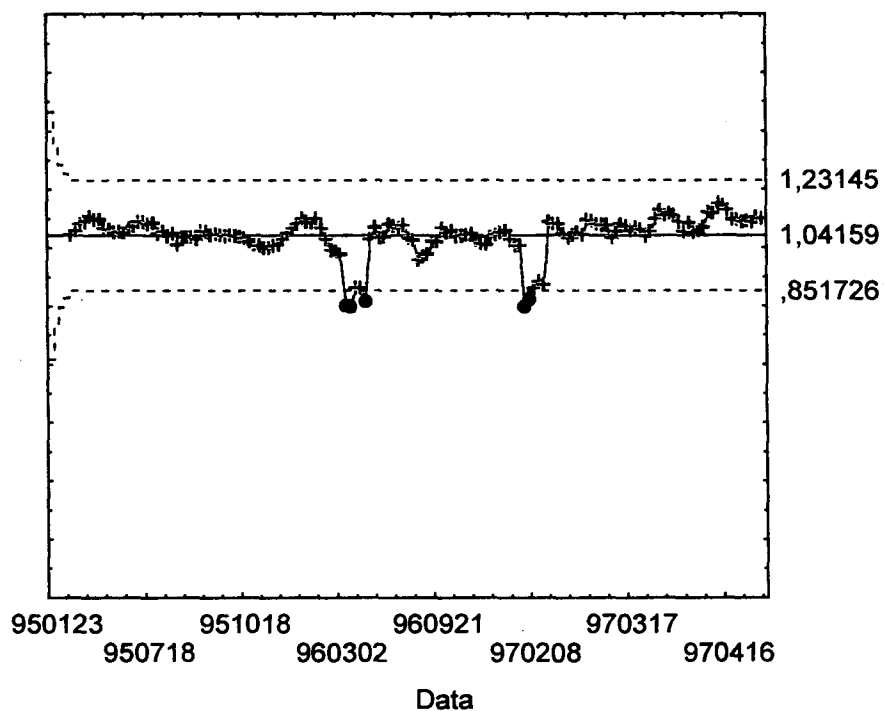
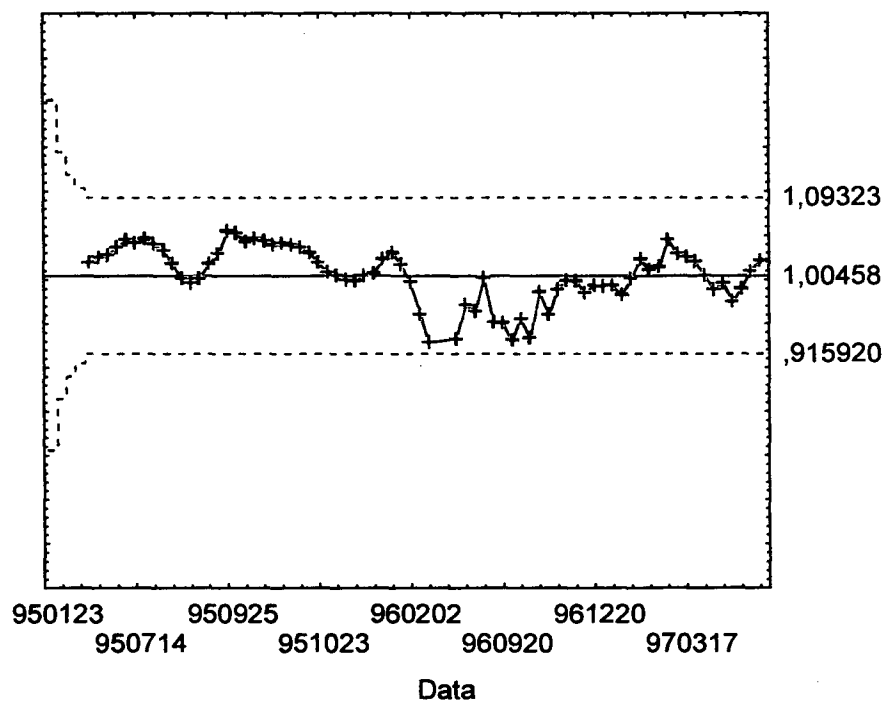


Gráfico MA (Revisado) - Unidade 18



Manutenções realizadas em 04/01 a 23/01/95, 05/02 a 28/02/96 e 08/01 a 23/01/97.

Figura 4.16: Gráfico de controle do índice de desempenho da turbina da unidade 18.

A seguir será apresentada uma análise geral dos resultados encontrados nos gráficos de controle.

A análise inicial da distribuição dos pontos locados nos gráficos mostrou pontos fora do limite de controle, sendo que apenas a turbina da unidade 14, não apresentou esta anomalia. O aparecimento destes pontos fora dos limites de controle, na grande maioria das turbinas pesquisadas, fez com que fosse necessária a realização de uma pesquisa, para se determinar as causas da origem destes pontos, levando em consideração as principais categorias de causas, descritas no capítulo 2, que tornam o processo fora de controle, ou seja, material, erros de operação, erros do processo, erros de uso de ferramentas, erros de medição ou erros de procedimentos ou métodos.

Entre as várias pesquisas realizadas, verificou-se que as principais causas da existência de pontos fora dos limites de controle, foram problemas relacionados com erros de medição ou erros do processo. Estes problemas, que influem na determinação das variáveis Potência Esperada e Potência Real e, conseqüentemente, nos valores calculados do índice de desempenho, devem merecer um cuidado especial, pois interferem nos resultados obtidos. Tendo em vista esta possibilidade e visando obter um gráfico de controle o mais realista possível, optou-se, então, por eliminar os pontos identificados como fora de controle, plotando novamente os gráficos de controle, chamando-os agora de “revisados”.

Neste caso em particular, considerando o fato de não ser o ideal a eliminação de dados, quando da construção de gráficos de controle, a aquisição direta e simultânea dos dados seria, com certeza, uma alternativa para se conseguir valores do índice de desempenho e gráficos de controle, os mais realistas possíveis.

Da análise dos pontos locados nos gráficos revisados, pode-se notar uma tendência, na maioria das turbinas pesquisadas, de recuperação do índice de desempenho, após a intervenção das equipes de manutenção, confirmando que o gráfico de controle é uma ferramenta de análise muito importante, quando se quer identificar algum acontecimento havido no decorrer do processo.

Como exemplo deste fato podemos relacionar as seguintes ocorrências observadas com relação as turbinadas pesquisadas:

- a turbina da unidade 02, após a revisão Anual e de Reparo de Cavitação realizada entre 27 de novembro e 21 de dezembro de 1995, apresentou uma tendência de melhora do seu índice de desempenho, permanecendo acima da média, indicando, inclusive, que a intervenção Quadrienal realizada entre 03 e 13 de dezembro de 1996, poderia ter sido realizada em outra época, ou seja, postergada;
- a turbina da unidade 04, após a revisão Anual realizada entre 27 de março e 19 de abril de 1995, apresentou uma tendência de estabilização do seu índice de desempenho próximo da média, porém, a partir novembro de 1995, apresentou índices com tendência de queda, indicando, que a intervenção Bienal realizada entre 03 e 22 de março de 1996, foi providencial, pois após a mesma, o índice de desempenho, voltou a ter tendência de alta;
- a turbina da unidade 07, após a revisão Quadrienal realizada entre 25 de março e 09 de abril de 1996, apresentou uma tendência de melhora do seu índice de desempenho;

De uma forma geral todas as turbinas estudadas apresentaram um comportamento de acordo com as suas características operacionais, ou seja, apresentaram uma variabilidade acentuada, com altos e baixos, porém, dentro de padrões aceitáveis.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões e recomendações com relação à proposta de acompanhamento do índice de desempenho de uma turbina hidráulica, através de gráficos de controle.

Capítulo 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Neste trabalho buscou-se apresentar uma visão geral da questão da qualidade e da utilização do controle estatístico do processo (CEP) como ferramenta de análise. Apresentaram-se as características principais dos gráficos de controle mais utilizados, os cuidados que devem ser tomados na sua aplicação e os critérios que devem ser observados nesta escolha.

A proposta de implantação de controle da performance das turbinas da ITAIPU BINACIONAL, através gráficos de controle, foi uma solução encontrada para melhor acompanhar o desempenho destes equipamentos. Esta solução foi escolhida em virtude da sua fácil aplicabilidade, em comparação com os métodos usuais de controle da eficiência de turbinas, utilizando-se dos mesmos dados, porém, sem necessidade de intervenção no equipamento.

Outro fator preponderante para a utilização do controle estatístico do processo como ferramenta de análise, foi a possibilidade de visualizar graficamente o comportamento da turbina ao longo do tempo, permitindo, inclusive, detectar possíveis anomalias no equipamento. A questão da manutenção também foi pensada, no que se refere ao direcionamento de intervenções menos frequentes, trazendo reflexos positivos em termos de menores custos de manutenção e maior disponibilidade de energia.

Com relação aos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. o controle estatístico do processo é uma ferramenta simples, porém poderosa, para controlar o processo, tanto daquele que está sob controle, quanto daquele que continua sob avaliação, devido a causas especiais;

2. a aplicação das técnicas estatísticas requer um aprendizado contínuo. Além disso, o esforço de implantação, aliado ao conhecimento do processo, possibilita obter os resultados, uma satisfação pessoal, que contribui para o sucesso do projeto;
3. a maioria das turbinas pesquisadas apresenta um comportamento homogêneo em certos períodos, ou seja, uma sazonalidade, como por exemplo, menores índices de desempenho no início de cada ano e recuperação do índice de desempenho após uma manutenção, demonstrando que o índice pode e deve ser utilizado como um instrumento capaz de ser um balizador, tanto com relação à necessidade, ou não, de manutenção, bem como, para controle de suas características operativas;
4. a questão da transposição dos dados do modelo para o protótipo se mostrou eficiente. A utilização de equações matemáticas diminuiu sensivelmente a possibilidade de subjetividade na indicação dos valores no ponto de "BEP - Best Efficiency Point", aumentando, desta forma, a repetibilidade dos valores a serem encontrados;
5. a questão da aferição dos reguladores de velocidade, também se mostrou confiável, pois os resultados exprimem com precisão os valores de abertura do distribuidor. É necessário, porém, que a cada nova aferição executada nos aparelhos, as pessoas responsáveis pela execução dos gráficos de controle, sejam avisadas e alterem os respectivos valores nas planilhas de cálculo.
6. a incidência de índices de desempenho acima de um (1.0), demonstram que em certos momentos as turbinas estão trabalhando acima de seus próprios limites, ou seja, acima do que seria previsto. É preciso, porém, tomar cuidado com estes resultados pois os mesmos podem conter erros de coleta de dados, ocasionando distorções nos resultados, devendo ser pesquisado os motivos que ocasionaram este fato, podendo ser por: calibração inadequada dos instrumentos de medição, leitura incorreta, ou não simultânea, dos valores de abertura do distribuidor, etc. .

5.2 Recomendações

Visando dar continuidade a proposta apresentada neste trabalho, algumas recomendações são feitas:

1. aumento do banco de dados, com a possibilidade de aquisição direta e simultânea dos dados de abertura do distribuidor, potência gerada e queda bruta, geraria gráficos de controle com índices de desempenho ainda mais realistas dos que já foram testados;
2. automação das planilhas de cálculo e geração dos gráficos, a fim de possibilitar maior agilidade ao processo, permitindo diminuir os tempos entre a coleta de dados e a geração dos gráficos de controle;
3. com relação à metodologia proposta, é fundamental que ela seja discutida, avaliada, dando a oportunidade que as pessoas envolvidas no processo sejam ouvidas, para que as possíveis incorreções, sejam observadas e que o sistema possa realmente dar uma contribuição, no sentido da melhoria da sistemática operativa da usina de ITAIPU;
4. a complementação de um estudo de gerenciamento do processo, adicionalmente contribuirá para que os ganhos obtidos possam continuar existindo, a longo prazo, certos de que os resultados e a metodologia proposta, não garantem por si só o sucesso pretendido.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASQC Statistics Division. **Glossary and Tables for Statistical Quality Control**. Milwaukee, American Society for Quality Control, 1983.
- BASTOS FILHO, Fernando J. C.; OLIVEIRA, Antônio J. S. e BENITEZ, Axel A. **Realização de Ensaio de Eficiência Relativa Utilizando Recursos Computacionais**. XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Balneário Camboriú, 1995.
- CAMPOS, Vicente Falconi. **Controle da Qualidade Total : no estilo japonês**. Rio de Janeiro, Bloch Editores, 1992.
- COOK, James; WALSH, James and VEITCH, Jamie. **Improving Performance with a Hydro Control System**. Artigo avulso, 1993.
- CROSBY, P. B. **Quality is free**. McGraw-Hill, New York, 1974.
- DEMING, W. Edwards. **Quality, productivity and competitive position**. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1982.
- DOTY, Leonard A. **Statistical Process Control**. Industrial Press Inc, New York, 1991.
- FEIGENBAUM, A. V. **Total Quality Control : engineering and management**. McGraw-Hill, New York, 1986.
- GILES, J. E.; JONES, R. K.; MARCH, P. A.; ARMOUR, H. and EPPS, J. M. **Microcomputer-aided planning at a hydro control centre**. Tennessee Valley Authority - TVA, 1990.
- HESS, J. L. and BRIGHT, L. R. **Statistical Process Control and Quality Partnerships**. Advances in instrumentation, vol. 43, 1988.
- ISHIKAWA, Kaoru. **TQC Total Quality Control: estratégia e administração da qualidade**. IMC, São Paulo, 1986.
- _____. **Itaipu Hydroelectric Project - Engineering Features**. Itaipu Binacional, Curitiba, 1994.
- JONES, R. K.; MARCH, P. A. and EPPS, J. M. **Monitoring Hydroturbines for Efficiency and Cavitation**. Hydro Review, pages 72 to 79, June 1989.
- JURAN, J. M. **Quality Control Handbook**. McGraw-Hill, New York, 1974.
- KUME, Hitoshi. **Statistical Methods for Quality Improvement**. The Association for Overseas Technical Scholarship, Tokyo, 1988.

- MACINTYRE, Archibald Joseph. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.
- MUCCILLO JÚNIOR, Francisco. **Ensaio Index-Test para Determinação do Rendimento Relativo - Turbina Kaplan**. Comissão de Integração Elétrica Regional, Subcomitê de Operação e Manutenção, SOPEM, São Paulo, 1997.
- PALADINI, Edson Pacheco. **Gestão da Qualidade no Processo**. Editora Atlas, São Paulo, 1995.
- SCOTT, R. Hamilton P. E. **Efficiency Monitoring Yields Large Revenue Gains**. *Water Power* 89, p. 1212 to 1221.
- SOUZA, Zulci de; FUCHS, R. D. e MOREIRA SANTOS, A. H. **Centrais Hidro e Termelétricas**. Edgar Blücher Ltda., São Paulo, 1983.
- STENZEL, J. N. **Coleta e Análise dos Resultados de Ensaios de Rendimento (Índice) em Turbinas Francis em várias condições de Operação**. IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, 1987.

BIBLIOGRAFIA

- DAVIS, Calvin Victor and SORENSEN, Kenneth E. **Handbook of Applied Hydraulics**. McGraw-Hill, New York, 1969.
- DE MATOS, Viviane L. D. **Implantação de Controle Estatístico do Processo em uma Olaria de Pequeno Porte**. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC, 1997.
- DRAIN, D. **Statistical Methods for Industrial Process**. Chapman and Hall, 1977.
- FREUN, J. E. **Modern Elementary Statistics**. Prentice Hall International, INC, New Jersey, 1988.
- _____. IEC 41. **Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump Turbines**. Third Edition, 1991.
- _____. IEC 193. **International Code for Model Acceptance Tests of Hydraulic Turbines**. Amendment N° 1, 1977.
- _____. IEC 193 A. **International Test Code for Cavitation Acceptance Tests for Model Hydraulic Turbines**. First Supplement to Publication 193, 1972.
- _____. IEC 308. **International Code for Testing of Speed Governing Systems for Hydraulic Turbines**, 1970.

- ____ IEC 545. **Guide for Commissioning, Operation and Maintenance of Hydraulic Turbines**, 1976
- ____ IEC 609. **Cavitation Pitting evaluation in Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines**, 1978.
- ____ IEC 805. **Guide for Commissioning, Operation and Maintenance of Storage Pumps and of Pump-Turbines Operating as Pumps**, 1985.
- ____ IEC 995. **Determination of the Prototype Performance from Model Acceptance Tests of Hydraulic Machines with Consideration of Scale Effects**, 1991.
- ____ IMAM. **Controle Estatístico do Processo. série qualidade e produtividade do IMAM**, 2ª Edição, 1989.
- KOVALEV, N. N. **Hydroturbines Design and Construction**. Mashgiz, Moscow, 1961.
- LOURENÇO FILHO, R. C. B. **Controle Estatístico da Qualidade**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1964.
- ____ NBR 11374. **Ensaio de Recepção de Turbinas Hidráulicas**, 1990.
- ____ NBR 6412. **Recepção em Modelos de Turbinas Hidráulicas. Ensaio**. 1988.
- NECHLEBA, Miroslav. **Hydraulic Turbines - Their Design and Equipment**. Artia, Prague, 1957.
- SAMOHYL, Robert W. **Controle Estatístico De Processos**. notas de aula, UFSC, 1995.
- SOMMER, Willy A. **Avaliação da Qualidade**. apostila do curso de pós-graduação em qualidade e produtividade, UNIOESTE/UFSC, 1996.

ANEXO

i - Fatores para determinação dos Limites 3σ dos Gráficos de Controle. (Fonte: DOTY, Leonard A., Statistical Process Control, Table A4, página 317.)

Table A4 Factors for Computing 3σ Control Chart Limits

Subsample Size	A ₂	A ₃	B ₃	B ₄	D ₃	D ₄
2	1.880	2.659	0	3.267	0	3.267
3	1.023	1.954	0	2.568	0	2.575
4	0.729	1.628	0	2.266	0	2.282
5	0.577	1.427	0	2.089	0	2.115
6	0.483	1.287	0.030	1.970	0	2.004
7	0.419	1.182	0.118	1.882	0.076	1.924
8	0.373	1.099	0.185	1.815	0.136	1.864
9	0.337	1.032	0.239	1.761	0.184	1.816
10	0.308	0.975	0.284	1.716	0.223	1.777
11	0.285	0.927	0.321	1.679	0.256	1.774
12	0.268	0.886	0.354	1.646	0.284	1.716
13	0.249	0.850	0.382	1.618	0.308	1.692
14	0.235	0.817	0.406	1.594	0.329	1.671
15	0.223	0.789	0.428	1.572	0.348	1.652

Subsample Size	d ₂	D ₁	D ₂
2	1.128	0	3.686
3	1.693	0	4.358
4	2.059	0	4.698
5	2.326	0	4.918
6	2.534	0	5.078
7	2.704	0.205	5.203
8	2.847	0.387	5.307
9	2.970	0.546	5.394
10	3.078	0.687	5.469
11	3.173	0.812	5.534
12	3.258	0.924	5.592
13	3.336	1.026	5.646
14	3.407	1.121	5.693
15	3.472	1.207	5.737

Values for subsample sizes to 25 and above are available (see Montgomery 1985, Appendix VI).